



HAL
open science

Structures périodiques et métamatériaux. Antennes et dispositifs électromagnétiques.

Shah Nawaz Burokur

► **To cite this version:**

Shah Nawaz Burokur. Structures périodiques et métamatériaux. Antennes et dispositifs électromagnétiques.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paris-Sud 11, 2013. tel-01137571

HAL Id: tel-01137571

<https://theses.hal.science/tel-01137571>

Submitted on 30 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOSSIER DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES
1 - SYNTHÈSE

présenté pour l'obtention du diplôme
d' HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
en Electronique

STRUCTURES PÉRIODIQUES ET
MÉTAMATÉRIAUX.
ANTENNES ET DISPOSITIFS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Shah Nawaz BUROKUR

Soutenue publiquement le 09/12/2013 devant un jury composé de :

<i>Rapporteurs</i>	Ronan Sauleau	Professeur, Université de Rennes 1
	Eric Lheurette	Professeur, Université de Lille
	Robert Staraj	Professeur, Université de Nice
<i>Examineurs</i>	Xavier Begaud	Professeur, Télécom ParisTech
	André de Lustrac	Professeur, Université Paris Ouest
<i>Invité</i>	Gérard-Pascal Piau	Senior Expert, EADS IW

Avant propos

Dans ce mémoire, je présente dans un premier temps mon Curriculum Vitae détaillé dans lequel on peut avoir un aperçu sur mes activités de recherche et d'enseignement ainsi que mes tâches administratives liées à la recherche et l'enseignement.

En ce qui concerne la recherche, j'ai soutenu ma thèse en novembre 2005 sur la mise en œuvre de métamatériaux et leurs applications aux antennes et aux circuits microondes. Depuis, j'ai continué à travailler sur le développement de ces matériaux composites pour des applications majoritairement liées aux antennes. Par la suite, j'ai été recruté en septembre 2009 comme Maître de Conférences à l'université Paris Ouest.

Ce manuscrit résume donc dans une deuxième partie mes activités de recherche durant ces huit dernières années.

Remerciements

Je remercie tout d'abord les doctorants et stagiaires que j'ai encadrés ces dernières années. En effet, c'est en grande partie leur travail de recherche qui me permet de prétendre à mon Habilitation à Diriger des Recherches. Je remercie Messieurs les Professeurs R. Sauleau, E. Lheurette et R. Staraj pour avoir accepté de juger mon travail et pour leur présence dans le jury. J'y associe bien évidemment le Professeur X. Begaud et M. G.-P. Piau qui ont également participé à ce jury. Leurs remarques et questions permettront certainement de faire émerger de futures études. Je remercie tout particulièrement André de Lustrac, qui m'a beaucoup apporté depuis que je suis arrivé à l'IEF en 2006 que ce soit scientifiquement ou humainement. En espérant qu'on aura beaucoup d'autres occasions pour discuter de tout et de rien autour d'une bière bien fraîche. Je remercie aussi tous les membres et anciens membres de l'équipe CRIME pour toutes les discussions scientifiques ou non, les repas et tous les autres moments que nous partageons ensemble. Ma pensée va également à mes collègues en enseignement à l'UFR SITEC et à l'IUT Ville d'Avray. Je remercie aussi les administratifs de l'UFR SITEC et de l'IEF qui y sont pour beaucoup dans notre environnement d'enseignement et de recherche. Je tiens également à remercier les personnes, académiques et industrielles, avec qui j'ai pu travaillé dans le cadre de projets nationaux ou internationaux. Pour finir, je remercie énormément Mikaëla pour toujours faire en sorte que je puisse bien allier mes activités professionnelles et familiales. En dernier, je dédie cette HDR à Anna et Erwan ; ils se reconnaîtront.

Table des matières

Avant propos	i
Remerciements	iii
Table des matières	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Curriculum Vitae	1
Synthèse des travaux scientifiques	31
Introduction générale	33
Présentation et synthèse des activités de recherche	33
Plan du manuscrit	35
1 Application de métasurfaces aux antennes et aux radômes	37
1.1 Introduction	37
1.1.1 État de l'art et contexte	38
1.1.2 Objectifs et contributions	40
1.2 Étude de métasurfaces passives	41
1.3 Conception d'antennes directives passives	42
1.3.1 Cavité blindée par des murs métalliques	43
1.3.2 Cavité excitée par de multiples sources	45

TABLE DES MATIÈRES

1.4	Étude de métasurfaces non-uniformes et actives	47
1.5	Conception d'antennes directives reconfigurables	49
1.5.1	Dépointage de faisceau	49
1.5.2	Agilité en fréquences	51
1.6	Conception d'antennes conformées	52
1.7	Conception de radômes conformés et reconfigurables	54
1.8	Conclusion et perspectives	56
	Bibliographie	57
2	Développement de métamatériaux	65
2.1	Introduction	65
2.1.1	État de l'art et contexte	66
2.1.2	Objectifs et contributions	67
2.2	Étude de fils coupés	68
2.2.1	Incidence normale	68
2.2.2	Incidence oblique	74
2.3	Étude de la structure en forme de Z	76
2.3.1	Étude en réflexion et transmission	77
2.3.2	Mise en évidence de modes piégés	81
2.4	Conclusion et perspectives	87
	Bibliographie	89
3	Transformation optique et applications	95
3.1	Introduction	95
3.1.1	État de l'art et contexte	96
3.1.2	Objectifs et contributions	98
3.2	Conception d'antennes	99
3.2.1	Antenne directive	99
3.2.2	Antenne azimuthale	104
3.3	Changement d'apparence physique d'une source rayonnante	108
3.3.1	Agrandissement de la taille physique et création d'un rayonnement isotrope	108
3.3.2	Réduction de la taille physique et création d'une émission directive	113
3.3.3	Rayonnement multi-faisceaux en spirale	118
3.4	Conception d'une transition de guide d'ondes	122
3.4.1	Principe de fonctionnement	122
3.4.2	Performances de la transition	124
3.5	Conclusion et perspectives	127
	Bibliographie	128
4	Antennes lentilles à gradient d'indice	135
4.1	Introduction	135
4.1.1	État de l'art et contexte	136
4.1.2	Objectifs et contributions	137

4.2	Conception de métamatériaux non-résonants planaires	137
4.3	Conception d'antennes lentilles large bande à gradient d'indice	141
4.3.1	Antenne lentille Lüneburg	143
4.3.2	Antenne lentille « Half Maxwell Fish-Eye »	147
4.4	Conclusion et perspectives	149
	Bibliographie	150
	Conclusions générales	153
	Bilan des travaux effectués	153
	Perspectives	154

Table des figures

0.0.1	Bloc schématique décrivant les différents axes de mes activités de recherche.	34
1.2.1	Antenne à cavité Fabry-Perot formée par une source excitatrice et deux surfaces réfléchissantes.	41
1.2.2	(a) Cellule unité de la SPR. (b)-(c) Réponses en amplitude et en phase.	42
1.3.1	Diagrammes de rayonnement de l'antenne à cavité plate ($\lambda_0/30$) réalisée dans [Ourir 06c].	43
1.3.2	Cavité blindée par des murs métalliques. (a) Principe. (b) Performances simulées. (c) Performances mesurées.	44
1.3.3	Cavité excitée par de multiples sources primaires. Performances pour différents espacements inter-éléments du réseau de sources.	46
1.3.4	Cartographie du champ E au niveau de la capacitive ($z = 1,5$) et inductive ($z = 2,97$) de la SPR dans des cavités pour le cas $0,5\lambda$ et 3λ .	47
1.4.1	Métasurface non-uniforme passive où on agit sur la grille capacitive.	48
1.4.2	Métasurface non-uniforme passive où on agit sur la grille inductive.	49
1.4.3	Métasurface non-uniforme active nécessitant l'intégration de diodes varicaps.	49
1.5.1	Métasurface non-uniforme passive utilisée comme SPR dans une antenne à cavité. (a) Variation de la capacitance. (b) Variation de l'inductance.	50
1.5.2	Métasurface non-uniforme active utilisée dans une antenne à cavité agile en fréquence.	51
1.6.1	Principe de la compensation de phase dans une cavité conformée.	53
1.6.2	Antenne à cavité conformée réalisée et diagrammes de rayonnement associés.	53
1.7.1	Radôme à base d'une SSF composée de fils métalliques et résultats associés.	55

2.2.1	Topologie des structures bi-couches permettant d'avoir un n négatif. (a) Combinaison de fils coupés et continus. (b) Structure « fishnet ». (c) Notre structure proposée composée de fils coupés uniquement.	69
2.2.2	Structure et réponses d'une paire de fils coupés symétriques ($dy = 0$) et ses caractéristiques sous une incidence normale. La longueur et la largeur des fils sont respectivement $l = 9,5$ mm et $w = 0,3$ mm. Les périodicités sont $a_x = 9,5$ mm et $a_y = 19$ mm.	70
2.2.3	Distribution du champ E : (a) Résonance magnétique, (b) Résonance électrique. (c) Réponses en transmission pour différents décalages dy . . .	71
2.2.4	Caractéristiques sous une incidence normale d'une paire de fils coupés asymétriques ($dy \neq 0$).	72
2.2.5	Mesures sur un prisme composé d'un empilement de couches de fils coupés asymétriques montrant un indice de réfraction négatif.	73
2.2.6	Réponses en incidence oblique dans le plan H sur des paires de fils coupés asymétrique.	75
2.2.7	Réponses en incidence oblique dans le plan E sur des paires de fils coupés asymétrique.	76
2.3.1	Transformations du résonateur ELC en « Z ».	78
2.3.2	Réponses des résonateurs ELC, I et Z.	79
2.3.3	Coefficients de transmission circulaire, angle de rotation θ et d'ellipticité η des résonateurs ELC et Z.	80
2.3.4	Mesures de transmission en polarisation croisée des résonateurs ELC, I et Z.	81
2.3.5	Paramètres effectifs des résonateurs ELC, I et Z.	82
2.3.6	Réflexion et transmission pour la configuration I.	83
2.3.7	Distribution de courant pour la configuration I.	84
2.3.8	Réflexion et transmission pour la configuration II.	85
2.3.9	Distribution de courant pour le Z asymétrique.	86
2.3.10	Réflexion et transmission en incidence normale pour le Z asymétrique. . .	87
3.2.1	Principe de la transformation d'une source isotrope en un rayonnement directif.	100
3.2.2	Schéma de principe de l'antenne directive.	101
3.2.3	(a) Alternance de couches de résonateurs magnétiques et électriques assurant les variations de μ_{yy} et ϵ_{zz} nécessaires. (b) Paramètres discrets utilisés dans les mesures comparés à ceux donnés par l'Eq. 3.2.4.	102
3.2.4	Comparaison simulation/expérience en champ proche et en champ lointain.	103
3.2.5	Principe de la transformation d'un rayonnement normal à une surface en un rayonnement azimuthal.	104
3.2.6	Profil des paramètres électromagnétiques réduits et résultats numériques de l'antenne azimuthale.	106

3.2.7	Structure proposée à base de lames composées de 10 cellules résonantes chacune.	106
3.2.8	L'antenne azimuthale réalisée et les performances obtenues.	107
3.3.1	Principe de la transformation d'une source directive en un rayonnement omnidirectionnel.	109
3.3.2	Photographie du prototype fabriqué pour démontrer le rayonnement isotrope.	111
3.3.3	Cellule unité du métamatériau utilisé, composé de 2 ELCs permettant d'obtenir les valeurs de ϵ_{rr} et $\epsilon_{\theta\theta}$	111
3.3.4	Cartographie du champ électrique de la source et du dispositif à métamatériaux.	112
3.3.5	Schéma de principe de la transformation d'une source isotrope en une émission directive.	113
3.3.6	Variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité dans la zone 2 du dispositif transformant un rayonnement isotrope en directif.	116
3.3.7	Performances du dispositif qui transforme un rayonnement isotrope en directif.	117
3.3.8	Schéma de principe de la transformation d'une source isotrope en un vortex.	118
3.3.9	Variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité dans la zone 2 du vortex.	119
3.3.10	Performances du vortex.	121
3.4.1	Schéma de principe de l'adaptateur de guide d'ondes.	122
3.4.2	Composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité de l'adaptateur.	124
3.4.3	Performances de l'adaptateur de guide d'ondes. (a)-(c) Jonction sans adaptateur. (d)-(f) Adaptateur linéaire. (g)-(i) Adaptateur parabolique. (j)-(l) Adaptateur exponentiel.	125
3.4.4	Évolution de la transmission suivant l'indice dans le petit guide.	126
4.2.1	Topologie d'un SRR et d'un CR et leurs réponses pour une onde électromagnétique incidente.	138
4.2.2	Application du principe de Babinet pour la conception du CCR.	139
4.2.3	Configuration de simulation du CCR et les paramètres S associées.	139
4.2.4	Exemples de valeurs d'indices pouvant être obtenues des CCRs.	140
4.2.5	Influence du gap g sur n_{eff} pour le CCR avec $l_x = l_y = 3,5$ mm.	141
4.3.1	Configuration de l'antenne-lentille Lüneburg à métamatériaux.	143
4.3.2	Gradient d'indice nécessaire pour la lentille de Lüneburg.	144
4.3.3	Adaptation de l'antenne lentille Lüneburg.	145
4.3.4	Cartographie du champ électrique de la lentille Lüneburg.	145
4.3.5	Diagrammes de rayonnement de l'antenne lentille Lüneburg.	146
4.3.6	Cartographie du champ électrique de la lentille HMFE.	147

TABLE DES FIGURES

4.3.7 Diagrammes de rayonnement de l'antenne lentille HMFÉ. 148

Liste des tableaux

0.1	Résumé des activités de recherche (encadrements d'étudiants, collaborations et publications).	36
1.1	Performances de la cavité blindée par des murs métalliques.	45
1.2	Performances des cavités avec différent espacement inter-éléments.	46
2.1	Fréquences de seuil de diffraction (GHz).	77
3.1	Composantes des tenseurs du matériau calculé.	123

Curriculum Vitae

État Civil

BUROKUR Shah Nawaz

Né le : 20 avril 1978

Situation familiale : Marié, 2 enfants

Nationalité : Française

Adresse : Bât A - 116, rue de Paris - 91120 Palaiseau

Tél : +33 (0)6 87 17 62 50

E-mail : shah-nawaz.burokur@u-psud.fr

Statut actuel

Grade : Maître de Conférences à l'UFR Systèmes Industriels et Techniques de Communication (SITEC) de l'Université Paris Ouest depuis septembre 2009

Discipline d'enseignement : Électronique et Électromagnétisme

Activité de recherche : Électromagnétisme, structures périodiques et antennes au sein de l'équipe CRISTaux photoniques et METamatériaux (CRIME) à l'Institut d'Électronique Fondamentale (IEF) de l'Université Paris-Sud

Titres universitaires

2005 Doctorat (Spécialité Électronique) Université de Nantes

Encadrants de thèse :

Directeur

Serge TOUTAIN, Professeur des universités

Institut de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nantes Atlantique (IREENA EA 1770)

Co-Directeur

Mohamed LATRACH, Enseignant-chercheur

Groupe Radio et Hyperfréquences, Centre d'Études et de Recherche
École Supérieure d'Électronique de l'Ouest (ESEO)

Jury de thèse :

Président

Daniel MAYSTRE, Directeur de Recherches CNRS, Institut Fresnel, Marseille

Rapporteurs

André de LUSTRAC, Professeur des universités, IEF, Paris

Thierry MONEDIÈRE, Professeur des universités, IRCOM, Limoges

Examineurs

Mohamed LATRACH, Professeur, ESEO, Angers

Serge TOUTAIN, Professeur des universités, IREENA, Nantes
Saïd ZOUHDI, Maître de Conférences/HDR, LGEP, Paris

Invités

Cyrille LEMEINS, Ingénieur, Thalès, Cholet
Christian SABATIER, Docteur, Ingénieur de Recherches - France Télécom R&D, La Turbie

2002	DEA Signal Télécom Image Radar	Université de Rennes1
2000	Maîtrise EEA	Université de Rennes1
1999	Licence EEA	Université de Rennes1
1998	DEUG Technologie Industrielle	Université de La Réunion
1995	HSC (équivalent du Bac)	Ile Maurice

Parcours

2007-2009 : Ingénieur Antennes et Hyperfréquences – SILICOM

Mission à l'Institut d'Électronique Fondamentale en collaboration avec Orange Labs (France Télécom R&D) :

- Mise en œuvre de métamatériaux actifs à phase variable
- Modélisation et conception d'une antenne multibande (DCS 1800 – UMTS – WIFI) hautement directive à base de métamatériaux à phase variable
- Étude et conception d'antennes compactes à base de métamatériaux à indice de réfraction nul

2006-2007 : Chercheur post-doctoral – Institut d'Électronique Fondamentale (Resp : A. de Lustrac)

Étude, simulation, réalisation et caractérisation :

- Antennes à cavité avec des épaisseurs très faibles (0,5 mm à 10 GHz) et de très bonnes directivités
- Antennes avec un contrôle angulaire sur le rayonnement du faisceau (dépôt d'un brevet en cours)
- Radôme conformé autour de 10 GHz utilisant un matériau à Bande Interdite Électromagnétique (BIE) commandable électroniquement (collaboration avec EADS – CCR)

2005-2006 : Chercheur post-doctoral – Laboratoire de Génie Électrique de Paris (Resp : S. Zouhdi)

- Étude de l'interaction d'une onde électromagnétique avec des matériaux possédant des propriétés particulières telles qu'un indice de réfraction négatif ou nul
- Modélisation analytique du transfert d'énergie à travers des couches de métamatériaux
- Réalisation d'un code de calcul du transfert d'énergie avec le logiciel Matlab

2002-2005 : Chercheur doctoral – École Supérieure d'Électronique de l'Ouest / Université de Nantes (Resp : M. Latrach et S. Toutain)

- Amélioration des performances d'antennes en utilisant des métamatériaux composites
- Conception de dispositifs passifs de faibles encombrements et de bonnes performances à base de métamatériaux
- Réalisation de filtres passifs de faibles dimensions en guide d'ondes et en structures plaquées micro-rubans

Activités d'enseignements

Licence 3 MIA (Mathématique Informatique et Applications)

CM/TD/TP : 16 étudiants

Logique séquentielle (10h CM) :

- Bascules (RS, D, JK, T)
- Registres (mémorisation, décalage)
- Compteurs/Décompteurs (Binaire naturel, DCB)

Master 1 EESC (Électronique Embarquée et Systèmes de Communication)

CM/TD : 24 étudiants

TP : groupe de 12 étudiants

DSP (10h CM, 10h TD, 2×20h TP) :

- Codage de nombres dans les machines numériques et opérations
- Présentation de l'architecture d'un processeur de signal, spécificités
- Développement logiciel (assembleur)
- Utilisation de bibliothèques spécialisées
- Optimisation logiciel

FPGA/VHDL (6h CM, 6h TD, 2×20h TP) :

- Logique programmable (classification des circuits intégrés)
- Technologies d'interconnexions
- ASICS (CPLD, FPGA)
- Initiation au langage VHDL
- Réalisation d'un modulateur QAM16 en amplitude et en phase
- Utilisation d'une carte FPGA SPARTAN XC3S200

Modélisation EM et Propagation (16h TP) :

- Initiation à la modélisation EM sous HFSS (code à éléments finis)
- Propagation dans un guide d'ondes, diviseur de puissance
- Ouverture rayonnante d'un guide, diagramme de rayonnement
- Adaptation d'impédance
- Structures périodiques

Antennes (2×8h TP) :

Une chambre anéchoïque étant opérationnelle depuis janvier 2012 sur le site de Ville d'Avray, j'ai mis en place une série de TP sur les mesures de rayonnement d'antennes. Ces mesures sont ensuite comparées aux résultats de simulations faites avec le logiciel commercial HFSS.

- Simulation et mesures d'antennes (patch et réseaux de patches)
- Notions de diagrammes de rayonnement, directivités, lobes secondaires

Master 2 EESC (Électronique Embarquée et Systèmes de Communication)

CM/TD : 24 étudiants

TP : groupe de 12 étudiants

Antennes (10h CM, 10h TD, 2×4h TP) :

Dans le cadre de l'habilitation du Master EESC, j'ai mis en place un nouveau cours sur les antennes qui se fait exceptionnellement en Master 2 pour l'année 2013-2014 et qui se fera en Master 1 par la suite.

- Généralités sur les antennes
- Paramètres caractéristiques d'une antenne
- Antennes filaires
- Antennes imprimées et antennes à fentes
- Réseaux d'antennes
- Ouvertures et réflecteurs

Stages et apprentissages (suivi de 8 étudiants en moyenne par an - tous niveaux confondus)

- Visites en entreprises
- Évaluation des rapports
- Membre de jury de soutenance
- Notation de la présentation orale

Activités administratives en enseignement

Depuis 2009 : Présentation de la filière 'Électronique' aux Journées Portes Ouvertes annuelle

Depuis 09/2010 : Responsable pédagogique de la formation Master 1 EESC

- recrutement des étudiants
- mise en place de l'emploi du temps (gestion de salles, enseignants, vacataires, ...)
- gestion de la recherche de stage et d'apprentissage

Depuis 09/2010 : Membre invité du Conseil d'UFR (UFR SITEC de l'Université Paris Ouest)

Depuis 01/2012 : Gestion des ressources (disponibilité et moyens) d'une chambre anéchoïque

Depuis 02/2013 : Membre du Comité Consultatif Disciplinaire (CCD) de la section 61/63

2012/2013 : Participation au montage du dossier d'habilitation pour 2014 en tant que responsable du M1 EESC

Activités liées à la recherche

Distinctions

- Bénéficiaire de la Prime d'Excellence Scientifique (PES) depuis septembre 2011
- Prix du Jeune Scientifique de la commission B de l'Union Radio-Scientifique Internationale (URSI) en 2005
- Letter of the month pour l'article "A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, Electronically reconfigurable metamaterial for compact directive cavity antennas, *Electronics Letters*, vol. 43, no. 13, pp. 698-700, June 2007"
- Article à la une (featured article) "D. Davies, Aiming for the sky, *Electronics Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 312, February 2013" basé sur nos travaux sur les antennes à cavités directives à faisceau dépointable

Expertise pour les revues et conférences

- Rapporteur pour les journaux Optics Express (OSA), Electronics Letters (IET), Microwaves, Antennas & Propagation (IET), Antennas and Wireless Propagation Letters (IEEE), Journal of Electromagnetic Waves and Applications (Taylor & Francis)
- Relecture d'articles pour la conférence META'12 qui s'est tenue à Paris en avril 2012
- Co-organisation et co-Chairman d'une session intitulée « Metamaterials for aeronautics and transports » à la conférence META'12
- Co-organisation et co-Chairman de la session « Metamaterials and Applications » à la conférence RADIO (en 2012 à l'île Maurice)

Séminaire

- Séminaire sur les métamatériaux et leurs applications en microondes en avril 2012 à la National University of Singapore (NUS)

Participation aux Jurys de thèse

- Thèse de R. Yahiaoui le 29 septembre 2011 à l'Université de Bordeaux (direction : V. Vigneras-Lefebvre et P. Mounaix)
- Thèse de P.-H. Tichit le 16 janvier 2012 à l'Université Paris-Sud (direction : A. de Lustrac et moi-même)
- Thèse d'A. Dhoubi le 18 novembre 2013 à l'Université Paris Ouest (direction : A. Priou et moi-même)

-
- Thèse de H. Ragad le 22 novembre 2013 à l'Université de Nantes (direction : A. Gharsallah, T. Razban et M. Latrach)

Brevet

- A. de Lustrac, A. Ourir, **S. N. Burokur**. Steerable Microwave Antenna : WO 2009115870 A1 - Septembre 2009, EP 2266166 A1 - Décembre 2010 et US 20110163930 A1 - Juillet 2011.

Valorisation

- Suite au dépôt de brevet sur notre concept d'antenne à cavité ultra-plate et hautement directive, nous travaillons actuellement avec la PME KYEMO pour valoriser ce concept au travers de la conception d'antennes plates pour les stations de bases pour la téléphonie mobile

Administration liée à la recherche

- Coordinateur du projet « METAQOPT » (METAmatériaux pour les structures Quasi-OPtiques) obtenu dans le cadre d'une bourse de la Fondation EADS
- Coordinateur d'une étude de faisabilité (Antennes à métamatériaux pour stations de base) avec la PME KYEMO

Encadrement

Stages Master 2

- B. Aoun de mars à août 2007 à 100% - **[MR-1]**
Sujet : Métamatériaux à gradient de permittivité pour le cloaking
But : Conception de métamatériaux simples qui présentent un gradient de permittivité allant de 0 à 1 nécessaire pour une application au cloaking (cape d'invisibilité)
Pas de publication
- A. Sellier de septembre 2007 à août 2008 (en apprentissage) à 100% - **[MP-1]**
Sujet : Conception de métamatériaux à indice négatif fonctionnant sous incidence normale
But : Utiliser des paires de fils coupés pour mettre en évidence un indice de réfraction négatif
Publications : 3 articles dans des revues, 1 communication en conférence internationale, 1 communication en conférence nationale
- R. Yahiaoui de mars à août 2008 à 100% - **[MR-2]**
Sujet : Antennes à Métamatériaux : applications aux télécoms civiles pour mobiles
But : Augmenter la directivité d'une antenne a cavité Fabry-Perot en utilisant plusieurs sources primaires judicieusement espacées
Publications : 2 articles dans des revues, 2 communications en conférences internationales, 1 communication en conférence nationale

-
- A. Ghasemi de avril à septembre 2012 à 100% - [MP-2]
Sujet : Antenne à cavité Fabry-Perot avec un dépointage de faisceau
But : Concevoir des antennes plates et hautement directives de type cavité Fabry-Perot et qui permettent aussi un dépointage de faisceau en utilisant un gradient de phase
Publications : 2 articles dans des revues
 - C. Heustache de avril à septembre 2013 à 100% - [MP-3]
Sujet : Lentilles à métamatériaux à gradient d'indice
But : Concevoir des lentilles plates à partir de l'ingénierie de métamatériaux à gradient d'indice de réfraction
Pas de publication

Thèses

- P.-H. Tichit à 50% (50% A. de Lustrac) qui a soutenu sa thèse en janvier 2012 - [T-1]
Financement : Bourse régionale
Sujet : Transformations d'espaces et applications électromagnétiques dans les domaines optiques et micro-ondes
But : Conception de dispositifs à base de métamatériaux en utilisant la technique de transformation d'espace
Publications : 5 articles dans des revues, 9 communications en conférences internationales, 3 communications en conférences nationales, 2 communications dans des journées scientifiques
- X. Liu à 35% (65% A. de Lustrac) qui a commencé sa thèse en septembre 2008 et qui n'a pas soutenu car il est rentré en Chine pour se faire soigner
Financement : Contrat industriel
Sujet : Antennes à métamatériaux pour les télécommunications mobiles
But : Mettre en œuvre une antenne cylindrique pour une station de base DCS 1800, UMTS et WIFI et conception d'antennes électriquement petites
Publications : 1 article dans une revue, 2 communications en conférences internationales
- A. Dhouibi à 70% (30% A. Priou) qui a soutenu sa thèse en novembre 2013 - [T-2]
Financement : Fondation EADS
Sujet : Développement de structures à métamatériaux : Application aux antennes large bande
But : Développer des métamatériaux large-bandes et concevoir des antennes lentilles planaires à base de métamatériaux à gradient d'indice
Publications : 8 articles dans des revues, 8 communications en conférences internationales, 3 communications en conférences nationales, 2 communications dans des journées scientifiques, dont une présentation invitée
- D. Germain à 35% (65% A. de Lustrac) qui a commencé sa thèse en septembre 2009 et soutiendra début 2014 - [T-3]

Financement : Projet ANR

Sujet : Antennes conformées et antennes pour vêtements intelligents

But : Utiliser les propriétés intéressantes des métamatériaux pour concevoir des antennes conformées et des antennes plates qui peuvent s'intégrer dans les vêtements de types combinaisons de pompiers

Publications : 2 articles dans des revues

- J. Yi à 50% (50% A. de Lustrac) qui a commencé sa thèse en novembre 2012 et soutiendra en novembre 2015 - [T-4]

Financement : Bourse MESR

Sujet : Transformation optique : Application aux antennes

But : Utiliser la technique de transformation d'espace pour concevoir des antennes électriquement petites

Pas de publication

- A. Niang à 50% (50% A. de Lustrac) qui a commencé sa thèse en novembre 2013 et soutiendra en novembre 2016 - [T-5]

Financement : Bourse de la plateforme Nano Design du campus Paris Saclay

Sujet : Antennes électriquement petites

But : Utiliser les éléments non-Foster dans la conception d'antennes électriquement petites

Pas de publication

Post-Docs

- P.-H. Tichit à 50% (50% A. de Lustrac) depuis janvier 2012 - [PstD-1]

Financement : Projet ANR et contrat industriel

Sujet : Transformation d'espace et conception de dispositifs (suite de sa thèse)

But : Conception de dispositifs à base de métamatériaux en utilisant la technique de transformation d'espace

Publications : 3 chapitres de livres, 5 articles dans des revues, 8 communications en conférences internationales, dont 2 présentations invitées, 1 communication en conférence nationale, 1 communication dans une journée scientifique

- J. Hao à 50% (50% A. de Lustrac) janvier à octobre 2013 - [PstD-2]

Financement : Contrat industriel

Sujet : Applications à base de métamatériaux

But : Conception d'antennes et de dispositifs à base de métamatériaux aux fréquences micro-ondes et optiques

Pas de publication

Projets et implications

Coordination de projets

- 2010-2013 : projet METAQOPT (METAMatériaux pour les structures Quasi-OPTiques) pour la Fondation EADS

-
- 2011 : Étude de faisabilité (Antennes à métamatériaux pour stations de base) avec la PME KYEMO

Implication dans des projets

- 2005-2008 : projet ANR METABIP

Le projet consistait à mettre en œuvre une antenne compacte et ultra-directive à base de métamatériaux dans les bandes de fréquences du DCS 1800, de l'UMTS et du WIFI. Ce projet était porté par M. de Lustrac de l'IEF et regroupait deux autres laboratoires universitaires (le LEAT et l'IETR), Orange Labs R&D et une PME (Advanten). Dans ce projet, j'avais la responsabilité des différents travaux effectués à l'IEF. J'avais pour mission de voir la définition et la conception de la source primaire fonctionnant dans les trois bandes de fréquences avec Orange Labs R&D, de mettre en œuvre l'antenne compacte et hautement directive à base de métamatériaux et aussi de m'occuper du transfert des données géométriques à la PME pour la fabrication du prototype. Je devais aussi assurer le lien entre la PME et Orange Labs pour les campagnes de mesures.

- 2009-2012 : projet ANR VERSO METAVEST

Le projet METAVEST (partenaires : IETR, IEF, LEAT, Advanten et Orange Labs) propose d'étudier différents types d'antennes à métamatériaux sur support textile susceptibles d'être intégrées dans des vêtements. Ces antennes devront couvrir les bandes GSM GPS et WiFi. Ces antennes profiteront à la fois des propriétés des métamatériaux (amélioration des diagrammes de rayonnement, de l'efficacité, de la largeur de bande, voire même diminution de la taille de l'antenne.), mais également des avancées dans le domaine des antennes électriquement petites. Elles devront être les plus discrètes possibles, et avoir un coût réduit de façon à être économiquement rentables. L'implication de l'IEF dans le projet se situait dans la conception et l'optimisation des antennes dans la bande GSM [790-862 MHz et 1710-2170 MHz]. Pour cela, nous avons utilisé le concept d'élément rayonnant sur un Conducteur Magnétique Artificiel (CMA) bi-bande.

- 2009-2012 : projet ANR METAPHORT

METAPHORT (partenaires : INRETS-LEOST, IETR, Telecom Bretagne, IEF, Lab-STICC, Eps&Mu, Alstom et XLIM) est un projet de recherche fondamentale qui traite la problématique de cohabitation de systèmes et d'antennes embarquées dans les transports ferroviaires pour permettre leur intégration dès la phase de conception du véhicule. L'objectif principal de ce projet est de proposer une approche suffisamment représentative du point de vue industriel pour prendre en compte les contraintes électromagnétiques d'intégration. L'IEF avait pour mission la conception et la réalisation d'une antenne WiFi à 5,7 GHz conformée sur une surface cylindrique. Dans ce projet, nous avons donc abordé la problématique des antennes conformées. Nous avons proposé d'utiliser une antenne à cavité Fabry-Perot où le réflecteur au-dessus de la source excitatrice est composé d'une structuration non-uniforme de cellules à métamatériaux pour compenser la différence de phase entre le réflecteur conformée et une qui est plane.

- 2009-2013 : projet DGA REI ABSORBANTS

Ce projet (partenaires : LEME, IEF et EADS IW) porte sur les nouvelles technologies de matériaux absorbants à base de métamatériaux. Nous avons pour rôle de concevoir et

de réaliser des absorbants ultra-minces à base de structures à métamatériaux. L'accent est mis sur l'élargissement de la bande d'absorption.

– 2010-2013 : projet METAQOPT

Ce projet, financé par la fondation EADS, dont je suis le coordinateur consiste à utiliser des structures à métamatériaux pour la réalisation de gradients d'indice nécessaires dans la mise en œuvre de lentilles focalisantes. Ces lentilles sont ensuite associées à des sources primaires pour réaliser des antennes-lentilles plates. Dans ce projet, nous utilisons des métamatériaux bien en-dessous de leurs fréquences de résonances de sorte que leurs caractéristiques électromagnétiques restent stables sur une large bande de fréquences. Ainsi, nous pouvons garantir des gradients d'indice sur une large bande et donc concevoir des antennes à métamatériaux large bande.

– 2010-2013 : projet EDA MIMICRA

Ce projet franco-anglais (partenaires : IEF, EADS IW, THALES, DASSAULT, Telecom ParisTech, Oxford University, Queen Mary College, BAE Systems) porte sur la conception et la réalisation d'antennes GPS planes et conformées en bande L (1164-1591 MHz) et fonctionnant en polarisation circulaire. L'accent est mis sur la réduction de l'encombrement et l'élargissement de la bande de fréquences de travail. A l'IEF, nous travaillons sur l'association de surfaces à métamatériaux avec des antennes imprimées pour l'élargissement de la bande de fréquences. Nous avons aussi comme tâche de montrer l'intérêt de la transformation optique dans la formation du faisceau rayonné.

– 2011 : Étude de faisabilité sur les antennes à métamatériaux pour les stations de base

Cette étude a été faite pour la société KYEMO, une PME, afin d'évaluer l'utilisation potentielle des métamatériaux dans les antennes pour les stations de base. Le concept de cavité Fabry-Perot a été proposée afin d'atteindre une directivité très haute sans pour autant utiliser un nombre important d'éléments rayonnants.

– 2013-2014 : projet ANTENNE MINIATURE

Ce projet financé par EADS porte sur la conception et la réalisation d'une antenne VHF pour l'aéronautique (117-137 MHz). L'accent est mis sur la réduction de la taille de l'antenne en utilisant des métamatériaux.

Synthèse des travaux

Ma thèse soutenue en novembre 2005 portait sur la mise en œuvre de métamatériaux en vue d'applications aux circuits microondes et aux antennes. Ces travaux débutés en septembre 2002, sous la direction M. Latrach et S. Toutain, s'inscrivaient dans le cadre d'une continuité des activités de recherche sur les structures périodiques à Bande Interdite Électromagnétique (BIE) à l'École Supérieure d'Électronique de l'Ouest (ESEO). L'objectif de la thèse était donc de comprendre et de mettre en évidence les propriétés intéressantes du résonateur SRR de J. B. Pendry pour des applications aux antennes et aux circuits microondes. Il s'agissait aussi par la suite de réaliser des dispositifs de

faible encombrement et de performances élevées qui s'intègrent facilement aux systèmes de télécommunications. Ces travaux ont été menés dans le domaine des microondes, plus particulièrement en bande X [8,2 GHz - 12,4 GHz]. Ma thèse a donc permis de présenter l'utilisation de ce résonateur dans des filtres planaires. De plus, une technique pour l'amélioration des performances d'une antenne patch a aussi été suggérée. Cette technique consiste à placer un métamatériau à indice négatif au dessus de l'antenne. Les résultats obtenus avec cette méthode ont montré une amélioration de 3 dB de la directivité.

Par la suite, mes travaux de recherches se sont orientés vers deux thèmes bien distincts :

1. Métasurfaces et antennes,
2. Structures à gradient, antennes et dispositifs microondes.

Dans le premier thème, on privilégie le développement de surfaces à métamatériaux pour la conception d'antennes. Un des concepts utilisés est celui de l'antenne à cavité Fabry-Perot (FP). Ce type d'antenne est composé d'une source primaire insérée entre deux réflecteurs parallèles. Généralement, les réflecteurs classiques présentent une phase de 180° . L'intérêt d'utiliser un réflecteur à métamatériaux réside dans le fait que les métamatériaux sont des structures à résonance LC. Donc, la phase varie de $+180^\circ$ à -180° en passant par 0° à la résonance. Or, la phase des réflecteurs est très importante dans ce type de dispositifs car elle impose l'épaisseur de la cavité. Ainsi, des antennes plates avec une épaisseur de l'ordre de $\lambda/60$ ont été modélisées, fabriquées et caractérisées et des directivités très grandes ont été obtenues expérimentalement sur ces structures. Nous avons aussi montré que l'utilisation de plusieurs sources primaires judicieusement espacées permet d'augmenter encore plus la directivité. D'autres performances telles que l'agilité en fréquence et la reconfigurabilité en dépointage de faisceau ont été recherchées sur ce type d'antennes. Ceci a été rendu possible grâce à l'ingénierie de phase sur les réflecteurs à métamatériaux. En effet, l'insertion d'éléments localisés (diodes varicaps) permet de changer soit globalement ou localement la phase du réflecteur. Un changement global permet donc de faire varier la fréquence de travail de l'antenne. Par contre, un changement local de phase (un gradient de phase) sur le réflecteur nous a permis de mettre en évidence le dépointage de faisceau dans les antennes à cavité. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet ANR « METABIP », qui regroupait d'autres laboratoires universitaires (IETR et LEAT) et aussi des industriels (Orange Labs et Advanten).

Toujours dans le domaine des antennes en microondes, j'ai aussi travaillé en collaboration sur les structures à Bande Interdite Électromagnétique (BIE) métalliques dans le cadre d'un projet financé par la fondation EADS. Ce projet portait sur la réalisation d'un radôme conformé autour de 10 GHz. La transmission du signal devait pouvoir être commutée d'un état passant à un état interdit. Cette commutation s'est faite par le biais de diodes PIN.

En ce qui concerne les perspectives sur ce premier thème, nous travaillons actuellement sur des antennes à cavité FP conformées sur des objets de forme cylindrique ou sphérique dans le cadre du projet ANR « METAPHORT ». Et dans ce cas, nous devons prendre en considération la différence de phase qui existe entre une surface courbée et

une surface plane dans l'ingénierie de notre réflecteur à métamatériau afin d'éviter des interférences destructives provoquant des distorsions dans les diagrammes de rayonnement des antennes.

Le deuxième thème est consacré à l'étude, la conception et la réalisation de méta-atomes présentant soit une résonance électrique ou une résonance magnétique, voire un indice de réfraction négatif. Les caractéristiques en incidence normale et oblique sont étudiées. Nous nous sommes aussi orientés vers les métamatériaux qui fonctionnent sur une large bande de fréquences et aussi vers les structures à métamatériaux présentant un gradient de paramètres électromagnétiques (permittivité, perméabilité et indice). Ces méta-atomes sont ensuite utilisés dans deux concepts différents. Le premier concept concerne l'étude des dispositifs issus de la technique dite « transformation optique ».

Cette technique a été introduite par J. B. Pendry et U. Leonhardt en 2006 afin de créer la première cape d'invisibilité électromagnétique. Cette méthode basée sur la covariance des équations de Maxwell lors d'un changement de coordonnées permet la création de nouveaux matériaux électromagnétiques ayant les propriétés souhaitées. Théoriquement, la méthode de transformation d'espace consiste à créer un nouvel espace transformé d'un espace initial où des solutions des équations de Maxwell sont connues. Tout d'abord, nous imaginons un espace virtuel avec les propriétés topologiques désirées. L'objectif principal est de créer un nouvel espace qui contient la physique fondamentale. Nous recueillons toutes ces propriétés dans le tenseur métrique afin d'exécuter les calculs. Bien que cette approche et calculs associés soient maintenant bien connus, J. B. Pendry a proposé une nouvelle interprétation où les nouveaux tenseurs des composantes de la perméabilité et de la permittivité peuvent être vus comme un matériau dans l'espace original. Tout se passe comme si le nouveau matériau imite l'espace topologique défini. Nous avons utilisé ces outils mathématiques pour la conception de dispositifs électromagnétiques et afin de mettre en œuvre ces dispositifs, des structures à gradient sont généralement nécessaires. Plusieurs exemples tels qu'une antenne directive et un rayonnement isotrope ont été réalisés à partir d'une source omnidirectionnelle dans le cadre de nos travaux, plus particulièrement la thèse de P.-H. Tichit. Pour la suite de cette thématique, J. Yi a commencé sa thèse en novembre 2012 et travaille actuellement sur la miniaturisation d'antennes en utilisant la technique de transformation optique.

Ce deuxième thème est aussi consacré à l'application de structures à gradient d'indice pour la conception d'antennes lentilles planaires présentant un fonctionnement large bande. Nous appliquons ici le concept de lentille de Luneburg et nous montrons l'apport des métamatériaux dans la réalisation de ce type de dispositifs. Nous travaillons actuellement sur deux lentilles : la lentille de Luneburg et la lentille Maxwell Fish-Eye (MFE). Une onde sphérique à la périphérie d'une lentille de Luneburg est transformée en une onde plane sur le côté opposé de la structure. En ce qui concerne la lentille MFE, un point source à la périphérie d'une telle lentille et son image conjuguée sont diamétralement opposés. Pour la lentille de Luneburg, l'indice de réfraction varie entre 1 et $\sqrt{2}$ et pour une lentille MFE, l'indice de réfraction varie entre 1 et 2. Au niveau du plan médian de la lentille MFE, les vecteurs d'onde sont plans. En d'autres termes, en implémentant une demie lentille Maxwell Fish-Eye (HMFE), un point source placé

sur un des points focaux de la structure produit, sur le plan médian de la MFE, une onde localement plane. Ainsi, les lentilles Lüneburg et HMFE peuvent être utilisées pour réaliser des antennes directives.

Pour réaliser les gradients d'indice des deux lentilles, la technique classique consiste à utiliser un nombre fini de couches concentriques de diélectriques sphériques et homogènes qui discrétisent la loi continue de la variation du gradient de l'indice de réfraction. Dans ce domaine, nos travaux effectués dans le cadre du projet « METAQOPT » financé par la fondation EADS portent sur des lentilles à gradient d'indice, réalisés par des métamatériaux, comme alternatives aux lentilles diélectriques stratifiées conventionnelles. Au lieu de contrôler le trajet de l'onde à l'interface entre deux diélectriques différents, on le fait par le gradient d'indice dans une structure à métamatériaux. Ainsi, nous avons mis en œuvre deux antennes lentilles plates à base de métamatériaux présentant une grande directivité. L'étape suivante est de montrer la possibilité de rendre cette antenne agile en fréquence et aussi de la rendre reconfigurable en dépointage angulaire. Ces travaux sont conduits dans le cadre de la thèse d'A. Dhouibi.

Mes activités de recherche sont donc orientés vers le développement de plusieurs types de surfaces à métamatériaux pour des applications dans le domaine des microondes. Ces applications concernent principalement les antennes que ce soit pour les communications satellites ou pour les stations de base pour la téléphonie mobile. Les performances recherchées via l'utilisation de métamatériaux sont la directivité, la réduction de l'encombrement et aussi la reconfigurabilité.

Liste de publications

Brevet

B-1. A. de Lustrac, A. Ourir, **S. N. Burokur**. Steerable Microwave Antenna : WO 2009115870 A1 - Septembre 2009, EP 2266166 A1 - Décembre 2010 et US 20110163930 A1 - Juillet 2011.

Chapitres d'ouvrages

O-1. A. de Lustrac, **S. N. Burokur**, P.-H. Tichit. Transformation electromagnetics and non-standard devices, *Transformation Electromagnetics and Metamaterials : Fundamental Principles and Applications*, edited by D. H. Werner and D.-H. Kwon, ISBN 978-1-4471-4995-8, Springer, 2014.

O-2. A. de Lustrac, **S. N. Burokur**, P.-H. Tichit. Transformation optics and antennas, *Metamaterials and wave control*, edited by E. Lheurette, ISBN 978-1-84821-518-4, Wiley-ISTE, 2013.

O-3. **S. N. Burokur**, A. Ourir, A. de Lustrac, R. Yahiaoui. Metasurfaces for high directivity antenna applications, *Metamaterial*, edited by X.-Y. Jiang, ISBN 978-953-51-0591-6, InTech, 2012.

-
- O-4.** A. de Lustrac, **S. N. Burokur**, B. Kanté, A. Sellier, D. Germain. Design and characterization of metamaterials for optical and radio communications, *Metamaterial*, edited by X.-Y. Jiang, ISBN 978-953-51-0591-6, InTech, 2012.
- O-5.** A. de Lustrac, **S. N. Burokur**, P.-H. Tichit, B. Kanté, R. Ghasemi, D. Germain. Spatial coordinate transformation and applications, *Metamaterial*, edited by X.-Y. Jiang, ISBN 978-953-51-0591-6, InTech, 2012.

Revue internationale avec comité de lecture

- RI-1.** A. Sellier, **S. N. Burokur**, G. Sabanowski, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Design of wide absorption peaks from ultrathin metamaterial structures, *Applied Physics A*, submitted August 2013.
- RI-2.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Spiral-like multi-beam emission via transformation electromagnetics, *Journal of Applied Physics*, submitted August 2013.
- RI-3.** X. Ding, K. Zhang, L. Zhang, **S. N. Burokur**, C.-W. Qiu, A. de Lustrac, Q. Wu. Experimental demonstration of an ultra-thin flat metalens with cross-polarization conversion efficiency approaching the theoretical limit, *Physical Review Letters*, submitted July 2013.
- RI-4.** R. Yahiaoui, U.-C. Chung, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, C. Elissalde, M. Maglione, V. Vigneras, P. Mounaix. Broadband effective magnetic response of inorganic dielectric resonators-based metamaterial for microwave applications, *Applied Physics A*, accepted October 2013.
- RI-5.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. Lupu, A. de Lustrac, A. Priou. Excitation of trapped modes from a metasurface composed of only Z-shaped meta-atoms, *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 18 (184103), October 2013.
- RI-6.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, C.-W. Qiu, A. de Lustrac. Experimental verification of isotropic radiation from a coherent dipole source via electric-field-driven LC resonator metamaterials, *Physical Review Letters*, vol. 111, no. 13 (133901), Septembre 2013.
- RI-7.** D. Germain, D. Seetharamdoo, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Phase-compensated metasurface for a conformal microwave antenna, *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 12 (124102), Septembre 2013.
- RI-8.** D. Germain, D. Seetharamdoo, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Thin conformal directive Fabry-Pérot cavity antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 926-929, 2013.
- RI-9.** A. Ghasemi, **S. N. Burokur**, A. Dhouibi, A. de Lustrac. High beam steering in Fabry-Pérot leaky-wave antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 261-264, 2013.
- RI-10.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Low-profile substrate-integrated lens antenna using metamaterials, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 43-46, 2013.

-
- RI-11.** A. Ghasemi, **S. N. Burokur**, A. Dhouibi, A. de Lustrac. Inductive-varying grid for highly beam-steerable cavity antennas, *Electronics Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 319-321, February 2013.
- RI-12.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Reducing physical appearance of electromagnetic sources, *Optics Express*, vol. 21, no. 4, pp. 5053-5062, February 2013.
- RI-13.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, X. Wu, D. Germain, A. de Lustrac. Novel antenna concepts via coordinate transformation, *Advanced Electromagnetics*, vol. 2, no. 1, pp. 25-32, February 2013.
- RI-14.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Metamaterial-based half Maxwell fish-eye lens for broadband directive emissions, *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 2 (024102), January 2013.
- RI-15.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Compact metamaterial-based substrate-integrated luneburg lens antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1504-1507, 2012.
- RI-16.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Antenna design concepts based on transformation electromagnetics approach, *Radioengineering (special issue on EuCAP 2012 - Latest Advances in Antennas & Propagation)*, vol. 21, no. 4, pp. 954-962, December 2012.
- RI-17.** N. Dubrovina, L. O. Le Cunff, **S. N. Burokur**, R. Ghasemi, A. Degiron, A. de Lustrac, A. Vial, G. Lerondel, A. Lupu. Single metafilm effective medium behavior in optical domain : Maxwell-Garnett approximation and beyond, *Applied Physics A : Materials Science & Processing (special issue of META'12)*, vol. 109, no. 4, pp. 901-906, December 2012.
- RI-18.** X. Wu, P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, S. Kirouane, A. Sellier, A. de Lustrac. Numerical and experimental demonstration of a coordinate transformation-based azimuthal directive emission, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 11, pp. 2536-2540, November 2012.
- RI-19.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Comparison of compact electric-LC resonators for negative permittivity metamaterials, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 10, pp. 2287-2295, October 2012.
- RI-20.** X. Liu, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, G. Sabanowski, G.-P. Piau. Compact base station antennas using metamaterials, *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 33, pp. 43-53, September 2012.
- RI-21.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom, *Advanced Electromagnetics (special issue of META'12)*, vol. 1, no. 2, pp. 64-70, August 2012.
- RI-22.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, V. Vigneras, A. de Lustrac, P. Mounaix. Investigation of spatial filters at microwave frequencies : application for antenna directivity enhancement, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 5, pp. 1327-1332, May 2012.

-
- RI-23.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Z-shaped meta-atom for negative permittivity metamaterials, *Applied Physics A : Materials Science & Processing*, vol. 106, no. 1, pp. 47-51, January 2012.
- RI-24.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Transformation media producing quasi-perfect isotropic emission, *Optics Express*, vol. 19, no. 21, pp. 20551-20556, October 2011.
- RI-25.** **S. N. Burokur**, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Low-profile frequency agile directive antenna based on an active metasurface, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, no. 10, pp. 2291-2295, October 2011.
- RI-26.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Coordinate-transformation-based ultra-directive emission, *Electronics Letters*, vol. 47, no. 10, pp. 580-582, May 2011.
- RI-27.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Design and experimental demonstration of a high-directive emission with transformation optics, *Physical Review B*, vol. 83, no. 15 (155108), April 2011.
- RI-28.** **S. N. Burokur**, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Tunable bi-layered metasurface for frequency reconfigurable directive emissions, *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 6 (064101), August 2010.
- RI-29.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Waveguide taper engineering using coordinate transformation technology, *Optics Express*, vol. 18, no. 2, pp. 767-772, January 2010.
- RI-30.** **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Negative index from asymmetric metallic cut wire pairs metamaterials, *EuMA International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 1, no. 6, pp. 521-527, December 2009.
- RI-31.** **S. N. Burokur**, T. Lepetit, A. de Lustrac. Incidence dependence of negative index in asymmetric cut wire pairs metamaterials, *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 19 (191114), November 2009.
- RI-32.** **S. N. Burokur**, R. Yahiaoui, A. de Lustrac. Subwavelength metamaterial-based resonant cavities fed by multiple sources for high directivity, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 8, pp. 1883-1888, August 2009.
- RI-33.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Enhanced directivity of an ultra-thin metamaterial-based cavity antenna fed by a multisource, *Electronics Letters*, vol. 45, no. 16, pp. 814-816, July 2009.
- RI-34.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, R. Yahiaoui, A. de Lustrac. Directive metamaterial-based subwavelength resonant cavity antennas – Applications for beam steering, *Comptes Rendus Physique*, vol. 10, no. 5, pp. 414-422, June 2009.
- RI-35.** **S. N. Burokur**, A. Ourir, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Highly directive ISM band cavity antenna using a bi-layered metasurface reflector, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 6, pp. 1393-1396, June 2009.

-
- RI-36.** A. P. Vinogradov, **S. N. Burokur**, S. Zouhdi. Effective parameters of metal-dielectric composites : influence of eddy currents due to density fluctuations, *EPJ Applied Physics*, vol. 46, no. 3 (32604), June 2009.
- RI-37.** S. Haché, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, F. Gadot, P. Cailleu, G.-P. Piau. Principles and applications of a controllable electromagnetic band gap material to a conformable spherical radome, *EPJ Applied Physics*, vol. 46, no. 3 (32611), June 2009.
- RI-38.** **S. N. Burokur**, A. Sellier, B. Kanté, A. de Lustrac. Symmetry breaking in metallic cut wire pairs metamaterials for negative refractive index, *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 20 (201111), May 2009.
- RI-39.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Ultra-directive antenna via transformation optics, *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 10 (104912), May 2009.
- RI-40.** A. Sellier, **S. N. Burokur**, B. Kanté, A. de Lustrac. Negative refractive index metamaterials using only metallic cut wires, *Optics Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6301-6310, April 2009.
- RI-41.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, A. Sellier, A. de Lustrac, J.-M. Lourtioz. Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials, *Physical Review B*, vol. 79, no. 7 (075121), February 2009.
- RI-42.** B. Kanté, A. de Lustrac, J.-M. Lourtioz, **S. N. Burokur**. Infrared cloaking based on the electric response of split ring resonators, *Optics Express*, vol. 16, no. 12, pp. 9191-9198, June 2008.
- RI-43.** B. Kanté, A. Ourir, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. de Lustrac. Metamaterials for optical and radio communications, *Comptes Rendus Physique*, vol. 9, no. 1, pp. 31-40, January 2008.
- RI-44.** C.-W. Qiu, **S. N. Burokur**, S. Zouhdi, L.-W. Li. Chiral nihility effects on energy flow in chiral materials, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 25, no. 1, pp. 55-63, January 2008.
- RI-45.** C.-W. Qiu, H.-Y. Yao, **S. N. Burokur**, S. Zouhdi, L.-W. Li. Electromagnetic Scattering Properties in a Multilayered Metamaterial Cylinder, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E-90-B, no. 9, pp. 2423-2429, September 2007 (Special Section on ISAP'06).
- RI-46.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Electronically reconfigurable metamaterial for compact directive cavity antennas, *Electronics Letters*, vol. 43, no. 13, pp. 698-700, June 2007.
- RI-47.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Phase-varying metamaterial for compact steerable directive antennas, *Electronics Letters*, vol. 43, no. 9, pp. 493-494, April 2007.
- RI-48.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Influence of Split Ring Resonators on the properties of propagating structures, *IET Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 1, no. 1, pp. 94-99, February 2007 (Special issue on Metamaterials).

-
- RI-49.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. A novel type of microstrip coupler utilizing a Slot Split-Ring Resonators defected ground plane, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 1, pp. 138-141, January 2006.
- RI-50.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. Analysis and design of waveguides loaded with Split-Ring Resonators, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 19, no. 10, pp. 1407-1421, October 2005.
- RI-51.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. Theoretical investigation of a circular patch antenna in the presence of a left-handed medium, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 183-186, 2005.
- RI-52.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. Study of the effect of dielectric Split Ring Resonators «SRRs » on microstrip line transmission, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 44, no. 5, pp. 445-448, March 2005.

Revue nationale avec comité de lecture

- RN-1.** A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. de Lustrac, A. Priou. Métamatériaux à gradient d'indice pour les antennes-lentilles large-bande, *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, no. 4, pp. 63-67, 2013.

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

Communications orales

- CI-1.** A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. de Lustrac, A. Priou. Broadband metamaterial-based half Maxwell fish-eye lens antenna, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Florida (USA), July 2013.
- CI-2.** A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. de Lustrac, A. Priou. X-band metamaterial-based Luneburg lens antenna, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Florida (USA), July 2013.
- CI-3.** P.-H. Tichit, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Coordinate transformation applied to change physical appearance of radiating sources, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Florida (USA), July 2013.
- CI-4.** X. Liu, S. N. Burokur, A. de Lustrac, G. Sabanowski, G.-P. Piau. Metamaterial-based compact cylindrical base station antennas, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Florida (USA), July 2013.
- CI-5.** S. N. Burokur, G.-P. Piau, G. Sabanowski, A. de Lustrac. Active metasurface for low-profile reconfigurable antennas, *EuCAP 2013*, Gothenburg (Sweden), April 2013. (Invited)

-
- CI-6.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Engineering of source appearance via transformation optics concept, *EuCAP 2013*, Gothenburg (Sweden), April 2013.
- CI-7.** **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Metamaterial-based Fabry-Pérot leaky wave antennas : low profile, high directivity, frequency agility and beam steering, *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2012)*, Mauritius, September 2012.
- CI-8.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Analysis of a subwavelength Z-shaped metamaterial, *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2012)*, Mauritius, September 2012.
- CI-9.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. New trends in antenna design : transformation optics approach, *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2012)*, Mauritius, September 2012.
- CI-10.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, V. Vigneras, A. de Lustrac and P. Mounaix. Highly directive emission from a frequency selective surface based Fabry-Pérot cavity antenna, *2nd International Congress on Telecommunication and Applications (ICTA'12)*, Béjaïa (Algeria), April 2012.
- CI-11.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12)*, Paris (France), April 2012.
- CI-12.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, X. Wu, D. Germain, A. de Lustrac. Novel antenna concepts via coordinate transformation, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12)*, Paris (France), April 2012. (Invited)
- CI-13.** N. Dubrovina, L. le Cunff, **S. N. Burokur**, R. Ghasemi, A. Degiron, A. de Lustrac, A. Vial, G. Lerondel, A. Lupu. Single metafilm effective medium behavior in optical domain : Maxwell-Garnett approximation and beyond, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12)*, Paris (France), April 2012.
- CI-14.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Z-shaped LC resonator for producing negative permittivity, *PIERS 2012*, Kuala Lumpur (Malaysia), March 2012.
- CI-15.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Quasi-perfect isotropic emission realized by coordinate transformation, *PIERS 2012*, Kuala Lumpur (Malaysia), March 2012.
- CI-16.** X. Wu, P.-H. Tichit, S. Kirouane, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Azimuthal directive emission realized by transformation optics concept, *PIERS 2012*, Kuala Lumpur (Malaysia), March 2012.
- CI-17.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, X. Wu, A. de Lustrac. Application of Coordinate Transformation for Novel Antenna Design Techniques, *EuCAP 2012*, Prague (Czech Republic), March 2012. (Invited)

-
- CI-18.** M. Gueye, H. H. Ouslimani, **S. N. Burokur**, A. Priou, Y. Letestu. Antenna array for Point-to-Point Communication in E-band frequency range, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington DC (USA), July 2011.
- CI-19.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Ultra-directive emission made by transformation optics, *EuCAP 2011*, Rome (Italy), April 2011.
- CI-20.** M. Gueye, Y. Letestu, A. Le Bayon, H. Ouslimani, **N. Burokur**, and A. Priou. New directive planar antenna for the next generation of point-to-point communication in E-band range (71-86 GHz), *PIERS 2011*, Marrakesh (Morocco), March 2011.
- CI-21.** **S. N. Burokur**, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Electronically tunable phase metasurface : application to frequency agile directive cavity antennas, *Metamaterials 2010*, Karlsruhe (Germany), September 2010.
- CI-22.** **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Multisource embedding in metamaterial-based cavities for directivity, *Metamaterials 2009*, London (UK), September 2009.
- CI-23.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Multisources fed metamaterial-based cavities for directivity enhancement, *ISAP 2008*, Taipei (Taiwan), October 2008.
- CI-24.** B. Kanté, F. Gadot, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Experimental and theoretical characterization of optical metamaterials, *NATO Advanced Research Workshop «Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies » (META'08)*, Marrakesh (Morocco), May 2008.
- CI-25.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. de Lustrac. Full characterization of planar infrared metamaterials from far field diffraction pattern, *SPIE Photonics Europe*, Strasbourg (France), April 2008.
- CI-26.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Passive and active beam steering of a metamaterial-based directive subwavelength cavity, *PIERS 2008*, Hangzhou (China), March 2008.
- CI-27.** S. Haché, **S. N. Burokur**, F. Gadot, P. Cailleu, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Cylindrical radome in X band using controllable electromagnetic band gap material, *EuCAP 2007*, Edinburg (UK), November 2007.
- CI-28.** S. Haché, **S. N. Burokur**, F. Gadot, P. Cailleu, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Controllable spherical radome in X band using electromagnetic band gap material, *Metamaterials'2007*, Rome (Italy), October 2007.
- CI-29.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Active variable phase metamaterial cavity for directive antenna, *Metamaterials'2007*, Rome (Italy), October 2007.
- CI-30.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Passive and Active Reconfigurable resonant metamaterial cavity for beam deflection, *IEEE AP-S International Symposium*, Honolulu (Hawaii), June 2007.
- CI-31.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. de Lustrac. Asymmetric Left-Handed metamaterial in microwave and infra-red regimes at normal incidence, *IEEE AP-S International Symposium*, Honolulu (Hawaii), June 2007.

-
- CI-32.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Bidimensional phase-varying metamaterial for steering beam antenna, *SPIE «International Congress on Optics and Optoelectronics » 2007*, Prague (Czech Republic), April 2007.
- CI-33.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Steerable ultra-thin directive antenna from a metamaterial-based subwavelength cavity, *International Workshop on Antenna Technology 2007 (IWAT)*, Cambridge (UK), March 2007.
- CI-34.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Coupling enhancement of parallel transmission lines using a Slot Split Ring Resonators defected ground plane, *XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, New Delhi (India), October 2005.
- CI-35.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Split Ring Resonators and Slot Split Ring Resonators : Influence on microstrip line transmission and possible applications, *11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, St-Malo (France), June 2005.
- CI-36.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Miniaturized planar filters using Slot Split Ring Resonators, *Télécom 2005 & 4^{èmes} Journées Franco-Maghrébines des Microondes et leurs applications*, Rabat (Morocco), March 2005.
- CI-37.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Design and fabrication of planar filters using metamaterials, *CNES-ESA International Workshop on Microwave Filters*, Toulouse (France), September 2004.
- CI-38.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Chainon, M. Himdi, S. Toutain. New technology of filters using LHM fabricated from 3D metallized foam, *CNES-ESA International Workshop on Microwave Filters*, Toulouse (France), September 2004.
- CI-39.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Analysis, design and testing of Split Ring Resonators for applications in the X-band, *27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas : Electromagnetic Bandgap, Left-Handed materials, Fractal and Frequency Selective Surfaces*, Santiago de Compostela (Spain), March 2004.
- CI-40.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Filtrage passe-bande moyennant les matériaux gauchers, *Télécom 2003 & 3^{èmes} Journées Franco-Maghrébines des Microondes et leurs applications*, Marrakech (Morocco), Octobre 2003.
- CI-41.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Structures métalldiélectriques appliquées à la réalisation de filtres, *17^{ème} Colloque International Optique Hertzienne et Diélectrique*, Calais (France), Septembre 2003.

Posters

- CI-42.** A. Dhoubi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Metamaterials-based gradient index broadband lens antennas, *Metamaterials'2013*, Bordeaux (France), September 2013.

-
- CI-43.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Interpretation of the electric resonance in Z-shaped meta-atom, *Metamaterials'2013*, Bordeaux (France), September 2013.
- CI-44.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Reducing and increasing the apparent size of electromagnetic sources through transformation optics, *Metamaterials'2013*, Bordeaux (France), September 2013.
- CI-45.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Broadband low profile substrate-integrated antenna based on gradient index lens, *EuCAP 2013*, Gothenburg (Sweden), April 2013.
- CI-46.** A. Lupu, P. Ghenuche, S. Collin, N. Bardou, N. Dubrovina, **S. N. Burokur**, R. Ghasemi, A. de Lustrac. Analysis of angle resolved spectroscopic measurements of a single metafilm on a dielectric substrate, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12)*, Paris (France), April 2012.
- CI-47.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, V. Vigneras, A. de Lustrac, P. Mounaix. Metasurfaces : characterization and application as Partially Reflecting Surfaces for directivity enhancement of patch antennas, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12)*, Paris (France), April 2012.
- CI-48.** X. Liu, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, G. Sabanowski, G.-P. Piau. Metasurfaces for ultracompact base stations, *PIERS 2012*, Kuala Lumpur (Malaysia), March 2012.
- CI-49.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Application of transformation optics concept for the design of an ultra-directive emission, *Metamaterials 2011*, Barcelona (Spain), October 2011.
- CI-50.** **S. N. Burokur**, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Frequency agile metamaterial-based directive cavity antennas, *XXXth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, Istanbul (Turkey), August 2011.
- CI-51.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Experimental verification of an ultra-directive emission based on transformation optics concept, *XXXth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, Istanbul (Turkey), August 2011.
- CI-52.** **S. N. Burokur**, T. Lepetit, P.-H. Tichit, A. de Lustrac. Refractive index of metallic cut-wire pairs metamaterials : influence of oblique incidence, *International Workshop on Antenna Technology 2010 (IWAT)*, Lisbon (Portugal), March 2010.
- CI-53.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Taper transitions between two rectangular waveguides via transformation optics, *International Workshop on Antenna Technology 2010 (IWAT)*, Lisbon (Portugal), March 2010.
- CI-54.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Transformation optics for a directive antenna, *Metamaterials 2009*, London (UK), September 2009.

-
- CI-55.** S. N. Burokur, A. de Lustrac. Simple asymmetric cut wire pairs producing negative index, *Metamaterials 2009*, London (UK), September 2009.
- CI-56.** S. N. Burokur, R. Yahiaoui, A. de Lustrac. Subwavelength resonant cavities fed by microstrip patch array, *International Workshop on Antenna Technology 2009 (IWAT)*, Santa Monica (USA), March 2009.
- CI-57.** A. Sellier, S. N. Burokur, B. Kanté, A. de Lustrac. Novel cut wires metamaterial exhibiting negative refractive index, *International Workshop on Antenna Technology 2009 (IWAT)*, Santa Monica (USA), March 2009.
- CI-58.** P.-H. Tichit, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Design of an ultra-directive antenna using spatial coordinate transformation, *International Workshop on Antenna Technology 2009 (IWAT)*, Santa Monica (USA), March 2009.
- CI-59.** B. Kanté, S. N. Burokur, F. Gadot, A. de Lustrac, J.-M. Lourtioz. Near field distribution for the infrared characterization of nano-metamaterials, *XXIXth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, Chicago (USA), August 2008.
- CI-60.** P.-H. Tichit, B. Kanté, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Design of polygonal and elliptical invisibility cloaks, *XXIXth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, Chicago (USA), August 2008.
- CI-61.** S. N. Burokur, A. Ourir, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, and A. de Lustrac. Application of reconfigurable bi-layered metamaterials in cavity antenna, *NATO Advanced Research Workshop «Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies » (META '08)*, Marrakesh (Morocco), May 2008.
- CI-62.** S. N. Burokur, B. Kanté, and A. de Lustrac. Engineering left-handed multi-layered metamaterials under normal to plane propagation, *NATO Advanced Research Workshop «Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies » (META '08)*, Marrakesh (Morocco), May 2008.
- CI-63.** S. Haché, S. N. Burokur, F. Gadot, P. Cailleu, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Conformable radomes based on bi-layered electromagnetic band gap materials, *NATO Advanced Research Workshop «Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies » (META '08)*, Marrakesh (Morocco), May 2008.
- CI-64.** A. Ourir, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Electronic beam steering of an active metamaterial-based directive subwavelength cavity, *EuCAP 2007*, Edinburg (UK), November 2007.
- CI-65.** B. Kanté, S. N. Burokur, A. Ourir, A. de Lustrac. Left-Handed asymmetric monolayer metamaterial under normal-to-plane propagation, *Metamaterials'2007*, Rome (Italy), October 2007.
- CI-66.** B. Kanté, S. N. Burokur, F. Gadot, A. de Lustrac. New design of double negative metamaterial for IR wavelengths, *Metamaterials'2007*, Rome (Italy), October 2007.
- CI-67.** B. Kanté, S. N. Burokur, F. Gadot, A. de Lustrac. Asymmetric geometry creates a negative index metamaterial in the microwave regime, *IEEE AP-S International Symposium*, Honolulu (Hawaii), June 2007.

-
- CI-68.** S. Haché, **S. N. Burokur**, F. Gadot, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Conformable and controllable radome in X band using Electromagnetic Band Gap material, *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough (UK), April 2007.
- CI-69.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Left-Handed Medium used for the enhancement of a patch antenna performances, *XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, New Delhi (India), October 2005.
- CI-70.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Phenomenon study of a microstrip line on a Slot Split Ring Resonators defected ground plane, *IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington DC (USA), July 2005.
- CI-71.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Left-Handed Medium effect on the characteristics of a circular patch antenna, *IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington DC (USA), July 2005.

Conférences nationales avec comité de lecture et actes

Communications orales

- CN-1.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Emissions directives par des lentilles planaires à métamatériaux large bande, *16^{èmes} Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-Nanoélectronique*, Grenoble, Juin 2013.
- CN-2.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Lentille planaire à gradient d'indice pour antenne directive large-bande, *18^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Paris, Mai 2013.
- CN-3.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Miniaturisation de filtres microrubans moyennant les propriétés de métamatériaux, *15^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Toulouse, Mai 2007.
- CN-4.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. Aassime, B. Belier, J. Mangeney, A. de Lustrac. Matériau à main gauche fonctionnant à 2 μ m, *15^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Toulouse, Mai 2007.
- CN-5.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Lignes couplées utilisant un plan de masse démétallisé de type Slot Split Ring Resonators «SSRRs» : application possible aux transpondeurs, *14^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Nantes, Mai 2005.

Posters

- CN-6.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Rayonnement omnidirectionnel par transformation optique, *18^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Paris, Mai 2013.
- CN-7.** A. Dhouibi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Etude et analyse d'un meta-atome électrique en forme de Z, *12^{èmes} Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux*, Chambéry, Mars 2012.

-
- CN-8.** S. N. Burokur, J.-P. Daniel, P. Ratajczak, A. de Lustrac. Reconfigurabilité en fréquence d'une antenne à cavité hautement directive à base de métamatériaux, *17^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Brest, Mai 2011.
- CN-9.** P.-H. Tichit, S. N. Burokur, D. Germain, A. de Lustrac. Un rayonnement ultra-directif par transformation optique, *17^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Brest, Mai 2011.
- CN-10.** P.-H. Tichit, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Adaptateur de guide d'onde par transformation spatiale, *17^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Brest, Mai 2011.
- CN-11.** S. N. Burokur, R. Yahiaoui, A. de Lustrac. Excitation multi-sources pour l'amélioration de la directivité dans des antennes à cavités, *16^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Grenoble, Mai 2009.
- CN-12.** S. N. Burokur, A. Sellier, B. Kanté, A. de Lustrac. Indice de réfraction négatif et brisure de symétrie dans un métamatériau composé des fils métalliques coupés, *16^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Grenoble, Mai 2009.
- CN-13.** P.-H. Tichit, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Conception d'une antenne ultra-directive par transformation de coordonnées spatiales, *16^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Grenoble, Mai 2009.
- CN-14.** A. Ourir, S. N. Burokur, A. de Lustrac. Cavités résonantes à base de métamatériaux reconfigurables - Application aux antennes directives, *15^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Toulouse, Mai 2007.
- CN-15.** S. Haché, S. N. Burokur, F. Gadot, P. Cailleu, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Radome conformé contrôlable en bande X à base de matériaux à bande interdite électromagnétique commandables pour l'aéronautique, *15^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Toulouse, Mai 2007.
- CN-16.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. Influence d'un métamatériau gaucher sur les caractéristiques d'une antenne patch, *14^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Nantes, Mai 2005.
- CN-17.** S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. Étude et application de structures métallo- diélectrique, *13^{èmes} Journées Nationales Micro-ondes*, Lille, Mai 2003.

Journées scientifiques et thématiques

- JS-1.** A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. de Lustrac, A. Priou. Émissions directives par des antennes-lentilles à métamatériaux, *Colloque National Métamatériaux 2013*, Orsay, Octobre 2013.
- JS-2.** A. Sellier, T. V. Teperik, S. N. Burokur, G. Sabanowski, G.-P. Piau, A. de Lustrac. Absorbant planaire ultra-mince à métamatériaux, *Colloque National Métamatériaux 2013*, Orsay, Octobre 2013.
- JS-3.** N. Dubrovina, S. N. Burokur, R. Ghasemi, A. Degiron, A. de Lustrac, A. Lupu. Approche milieu effectif dans le domaine optique appliquée à une monocouche de métamatériau sur substrat diélectrique, *Journées scientifiques du CNFRS "L'électromagnétisme, 150-1 : une science en pleine action !"*, Paris, Mars 2013.

-
- JS-4.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Conception d'antennes par transformation d'espace, *Journées scientifiques du CNFRS "L'électromagnétisme, 150-1 : une science en pleine action!"*, Paris, Mars 2013.
- JS-5.** A. Dhoubi, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, A. Priou. Métamatériaux à gradient d'indice pour les antennes-lentilles, *Journées scientifiques du CNFRS "L'électromagnétisme, 150-1 : une science en pleine action!"*, Paris, Mars 2013.
- JS-6.** N. Dubrovina, L. O. Le Cunff, X. Leroux, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac, S. Blaize, A. Vial, G. Lerondel, A. Lupu. Metal-dielectric metamaterials effective medium behavior in the near-infrared domain, *Journées thématiques "Modélisation du visible au THz & Plasmonique moléculaire"*, GDR Ondes, Troyes, Novembre 2012.
- JS-7.** R. Yahiaoui, **S. N. Burokur**, V. Vigneras, A. de Lustrac, P. Mounaix. Amélioration de la directivité d'antennes imprimées, *GDR Ondes - GT4 "Interférences d'ondes 2011"*, Nice, Octobre 2011.
- JS-8.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Ingénierie par transformation d'espace, *Colloque National Métamatériaux 2011*, Orsay, Mars 2011.
- JS-9.** A. de Lustrac, B. Kanté, **S. N. Burokur**, P.-H. Tichit, D. Germain. Antennes directives calculées par transformation d'espace, *Réunion du groupe de travail sur les antennes et les réseaux très larges bandes du GDR Ondes*, Paris, Mars 2010.
- JS-10.** **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Augmentation de la directivité dans une antenne à cavité à base de métamatériaux, *GDR Ondes - GT4 "Interférences d'ondes 2009"*, Paris, Novembre 2009.
- JS-11.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Ingénierie par transformations d'espace, *GDR Ondes - GT5 "Interférences d'ondes 2009"*, Paris, Novembre 2009.
- JS-12.** X. Liu, A. de Lustrac, **S. N. Burokur**. Conception d'une antenne omnidirectionnelle large bande à métamatériaux, *GDR Ondes - GT4 "Interférences d'ondes 2009"*, Paris, Novembre 2009.
- JS-13.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Cavité à base de métamatériaux pour le contrôle directionnel passif et actif du rayonnement des antennes, *GDR Ondes - GT4 "Antennes, circuits et outils de conception dédiés"*, Paris, Septembre 2007.
- JS-14.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. De Lustrac. Métamatériau main gauche asymétrique en micro-onde et en infrarouge en incidence normale, *Journées scientifiques du CNFRS "Nanosciences et Radioélectricité"*, Paris, Mars 2007.
- JS-15.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Métamatériaux à phase électroniquement variable pour antenne reconfigurable, *Journées scientifiques du CNFRS "Nanosciences et Radioélectricité"*, Paris, Mars 2007.
- JS-16.** B. Kanté, **S. N. Burokur**, F. Gadot, A. de Lustrac. Métamatériau à indice de réfraction négatif en infrarouge, *AREMIF - Journée des doctorants*, Paris, Mars 2007.

-
- JS-17.** A. Ourir, **S. N. Burokur**, A. de Lustrac. Métamatériau bidimensionnel à variation de phase pour des antennes à faisceau contrôlable, *GDR Ondes - GT2 "Structures photoniques et plasmoniques pour la détection de molécules"*, Marseille, Décembre 2006.
- JS-18.** **S. N. Burokur**, M. Latrach, S. Toutain. Métamatériaux gauchers - Application aux circuits microondes, *Journées Scientifiques du CNFRS "Interaction du champ électromagnétique avec l'environnement"*, Paris, Février 2005.

Conférences invitées

- Inv-1.** **S. N. Burokur**, G.-P. Piau, G. Sabanowski, A. de Lustrac. Active metasurface for low-profile reconfigurable antennas, *EuCAP 2013*, Gothenburg (Sweden), April 2013.
- Inv-2.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, X. Wu, D. Germain, A. de Lustrac. Novel antenna concepts via coordinate transformation, *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META '12)*, Paris (France), April 2012.
- Inv-3.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, X. Wu, A. de Lustrac. Application of Coordinate Transformation for Novel Antenna Design Techniques, *EuCAP 2012*, Prague (Czech Republic), March 2012.
- Inv-4.** P.-H. Tichit, **S. N. Burokur**, D. Germain, A. de Lustrac. Ultra-directive emission made by transformation optics, *EuCAP 2011*, Rome (Italy), April 2011.

Synthèse des travaux scientifiques

Introduction générale

Présentation et synthèse des activités de recherche	33
Plan du manuscrit	35

Présentation et synthèse des activités de recherche

Ce manuscrit présente une synthèse de mes travaux de recherche effectués depuis l'obtention de mon doctorat en Novembre 2005. Il détaille les différents cadres de ces travaux, notamment si les projets ont été effectués en collaboration avec d'autres groupes de recherche universitaires ou industriels et si les projets se déroulaient sur le plan national ou international. S'y trouve aussi une liste détaillée des différents encadrements auxquels j'ai contribué, ainsi qu'une liste de mes publications en relations avec mes travaux de recherche. Les publications majeures de cette liste sont regroupées dans un document annexe.

Mes travaux de recherche, qui sont effectués dans le domaine des microondes, sont regroupés sous deux thèmes bien distincts :

1. Métasurfaces et antennes,
2. Structures à gradient, antennes et dispositifs microondes.

Chaque thème regroupe plusieurs axes comme illustré sur la Fig. 0.0.1. Les différents axes sont :

– **Thème 1 : Métasurfaces et antennes**

– *Axe 1.1 : Métasurfaces*

Ce premier axe est consacré à l'étude des caractéristiques, la conception et la mise en œuvre de surfaces à métamatériaux (aussi appelées métasurfaces). Ces métasurfaces sont composées d'une structuration, qui peut être uniforme ou pas, de cellules résonantes LC imprimées sur un substrat diélectrique.

– *Axe 1.2 : Antennes à cavité Fabry-Perot (FP)*

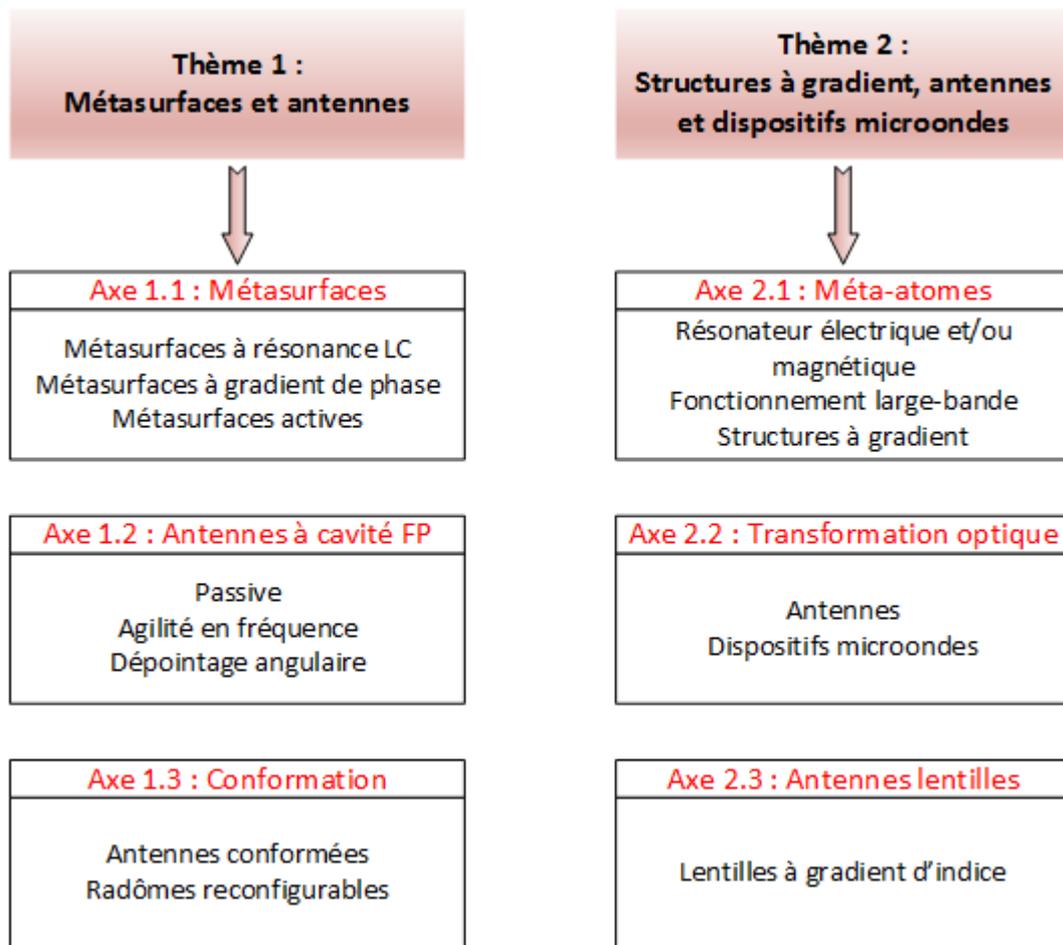


FIGURE 0.0.1: Bloc schématique décrivant les différents axes de mes activités de recherche.

Ce deuxième axe est en étroite relation avec la mise en œuvre des métasurfaces de l'axe 1.1. Il s'agit ici d'utiliser ces métasurfaces comme réflecteurs dans des antennes à cavités Fabry-Perot. Plusieurs caractéristiques seront recherchées en terme de performances : faible épaisseur, haute directivité, agilité en fréquence et dépointage angulaire du faisceau.

– *Axe 1.3 : Conformation*

L'aspect conformation est traité dans l'axe 1.3 sur des antennes à cavités FP, ainsi que sur des radômes. Dans cet axe de travail, les métasurfaces sont conformées sur des objets de forme cylindrique ou sphérique.

– **Thème 2 : Structures à gradient, antennes et dispositifs microondes**

– *Axe 2.1 : Méta-atomes*

Cet axe est consacré à l'étude, la conception et la réalisation de méta-atomes présentant soit une résonance électrique ou une résonance magnétique, voire un indice de réfraction négatif. L'étude des caractéristiques en incidence normale et oblique est faite. Nous nous sommes aussi orientés vers les métamatériaux qui fonctionnent sur une large bande de fréquences et aussi vers les structures à métamatériaux présentant un gradient de paramètres électromagnétiques (permittivité, perméabilité et indice).

– *Axe 2.2 : Transformation optique*

Dans cet axe, nous étudions des dispositifs issus de la technique dite « transformation optique ». Afin de mettre en œuvre ces dispositifs, des structures à gradient sont généralement nécessaires, d'où l'application directe des structures issues de l'axe 2.1.

– *Axe 2.3 : Antennes lentilles*

L'axe 2.3 est consacré à l'application de structures à gradient d'indice dans la conception d'antennes lentilles planaires avec un fonctionnement large bande.

Les travaux cités ci-dessus ont été faits et sont toujours en cours dans le cadre de stages de Master et de thèses de doctorat. Le Tab. 0.1 récapitule mes encadrements de stagiaires et de doctorants, les publications et les collaborations associées à mes activités de recherche.

Plan du manuscrit

Ce manuscrit est décomposé en quatre chapitres :

- Le **chapitre 1** porte sur la conception d'antennes directives et de radômes utilisant des métasurfaces. L'étude des métasurfaces (uniformes, non-uniformes, passives et actives) sera abordé. Les performances telles que : faible épaisseur, haute directivité, agilité en fréquence et dépointage angulaire du faisceau seront présentées.
- Le **chapitre 2** est consacré au développement de métamatériaux résonants présentant soit une résonance électrique ou une résonance magnétique ou même les deux. L'étude des caractéristiques sous incidence normale et oblique sera présentée sur des paires de fils coupés. L'excitation de modes piégés dans un métamatériau de type « Z » sera aussi mise en évidence.
- Le **chapitre 3** introduit la notion de transformation optique et porte sur la conception de dispositifs issus de cette technique. Une étude préalable de structures à gradient de permittivité ou de perméabilité est nécessaire pour ce chapitre.
- Le **chapitre 4** est consacré à la conception d'antennes lentilles à base de métamatériaux à gradient d'indice. Une attention particulière est portée sur les caractéristiques large bande des métamatériaux et des antennes.

En introduction de chaque chapitre, j'indiquerai succinctement les encadrements d'étudiants ainsi que les publications qui s'y rattachent.

	Thème 1	Thème 2
Thèse soutenue		
Date soutenue : Nom - [Référence]		Jan. 2012 : P.-H. Tichit - [T-1]
Thèses en cours		
Date de soutenance prévue : Nom - [Référence]	Déc. 2013 : D. Germain - [T-3]	Déc. 2013 : A. Dhoubi - [T-2] Déc. 2015 : J. Yi - [T-4]
Post-doctorats		
Année : Nom - [Référence]	2012-2013 : J. Hao - [PstD-2]	2011-2013 : P.-H. Tichit - [PstD-1]
Masters (Recherche et Professionnel)		
Année : Nom - [Référence]	2008 : R. Yahiaoui - [MR-2] 2012 : A. Ghasemi - [MP-2]	2007 : B. Aoun - [MR-1] 2008 : A. Sellier - [MP-1] 2013 : C. Heustache - [MP-3]
Collaborations	IETR, LEAT, IFSTTAR, Orange Labs, Advantem, EADS, ASTRIUM et Alstom	LEME, IMS, LOMA, NUS, Queen Mary College, Dassault et EADS
Publications		
- Brevet	1	
- Chapitres dans des ouvrages	1	4
- Revues internationales	15	26 (+2 soumis)
- Revues nationales	0	1
- Communications dans des congrès internationaux	22	36
- Communications dans des congrès nationaux	4	9
- Journées scientifiques et thématiques	6	9

TABLE 0.1: Résumé des activités de recherche (encadrements d'étudiants, collaborations et publications).

Chapitre 1

Application de métasurfaces aux antennes et aux radômes

1.1	Introduction	37
1.1.1	État de l'art et contexte	38
1.1.2	Objectifs et contributions	40
1.2	Étude de métasurfaces passives	41
1.3	Conception d'antennes directives passives	42
1.3.1	Cavité blindée par des murs métalliques	43
1.3.2	Cavité excitée par de multiples sources	45
1.4	Étude de métasurfaces non-uniformes et actives	47
1.5	Conception d'antennes directives reconfigurables	49
1.5.1	Dépointage de faisceau	49
1.5.2	Agilité en fréquences	51
1.6	Conception d'antennes conformées	52
1.7	Conception de radômes conformés et reconfigurables	54
1.8	Conclusion et perspectives	56
	Bibliographie	57

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les travaux effectués dans le cadre du thème 1. Il porte sur la conception et la mise en œuvre de surfaces composées de structures périodiques ou non-périodiques appelées « métasurfaces » pour des applications liées aux antennes et aux radômes. Dans un premier temps, nous présentons un état de l'art sur l'utilisation de structures périodiques dans le domaine des antennes qui sera suivi par une énumération de nos objectifs et principales contributions sur cette thématique. Nous parlerons de métasurfaces uniformes passives et leurs utilisations dans la conception d'antennes à

cavités Fabry-Perot (FP) à faible profil et directives. Nous passerons ensuite au cas des métasurfaces non-uniformes passives et actives qui sont appliquées à la conception d'antennes reconfigurables, que ce soit en terme de fréquence de travail ou de dépointage angulaire. En dernier lieu, nous nous orientons vers les métasurfaces conformées pour des applications aux antennes et radômes montés sur des objets non linéaires tels que des cylindres ou des sphères.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux cités ci-dessous :¹

Thèse en cours	[T-3]
Post-Doctorat	[PstD-2]
Masters	[MR-2], [MP-2]
Brevet	B-1
Chapitre	O-3
Revue internationale	RI-7, RI-8, RI-9, RI-11, RI-20, RI-25, RI-28, RI-32, RI-33, RI-34, RI-35, RI-37, RI-43, RI-46, RI-47
Communications internationales	CI-4, CI-5, CI-7, CI-10, CI-21, CI-22, CI-23, CI-26, CI-27, CI-28, CI-29, CI-30, CI-32, CI-33, CI-47, CI-48, CI-50, CI-56, CI-61, CI-63, CI-64, CI-68
Communications nationales	CN-8, CN-11, CN-14, CN-15, JS-5, JS-10, JS-12, JS-13, JS-15, JS-17
Communication invitée	Inv-1
Collaborations	IETR, LEAT, IFSTTAR, Orange Labs, Advantem, Kyemo, EADS, ASTRIUM, Alstom

1.1.1 État de l'art et contexte

Dans le domaine des antennes, les structures périodiques ont été et sont toujours largement étudiées pour leurs utilisations en tant que :

- réflecteurs [Marconi 19]
- radômes [Munk 05, Balanis 08, Poilasne 00a]
- filtres [Yang 98, Chang 01, Chang 03]
- absorbants [Itou 04, Costa 10, Seman 11, Li 12, Sun 12]
- substrats d'antennes pour diverses fonctions, telles que :
 - suppression d'ondes surfaciques [Sievenpiper 99]
 - découplage entre éléments rayonnants [Yang 03, Saenz 09]
 - miniaturisation des antennes [Mosallaei 04, Sarabandi 06, Bernard 11, Dong 11, Dong 12]
- superstrats, dans le but de :
 - réduire la Surface Équivalente Radar (SER) [Collardey 05]
 - guider le rayonnement [Poilasne 00b, de Lustrac 01, Chen 06, Ma 09]

1. Toutes les références énumérées dans le tableau sont données dans la partie Curriculum Vitae. Une copie des publications majeures est jointe en annexe.

- augmenter la directivité et le gain des antennes [Burokur 05, Attia 09, Latrach 10]. C'est plus particulièrement dans ce domaine que j'exposerai mes travaux réalisés sur les antennes à cavité Fabry-Perot. Une bibliographie plus riche sur ce type d'antennes est proposée dans les paragraphes suivants.

Dans la littérature, on peut trouver beaucoup d'études publiées sur l'amélioration des performances des antennes patch micro-rubans. La plupart des solutions proposées dans le passé ont été d'utiliser un réseau de plusieurs antennes. L'inconvénient majeur de cette méthode provient de l'alimentation de chaque antenne qui introduit des pertes et du couplage entre chaque élément rayonnant. D'autres solutions intéressantes ont ensuite été proposées : tout d'abord Jackson et Alexópoulos font usage d'un superstrat de haute permittivité ou perméabilité au-dessus de l'antenne [Jackson 85] et Nakano, quant à lui, met en « sandwich » l'antenne entre des couches diélectriques de même permittivité [Nakano 04]. Dans le cadre de mes travaux de thèse, j'ai aussi proposé d'utiliser un superstrat où la permittivité et la perméabilité sont simultanément négatives au-dessus de l'antenne [Burokur 05]. Ce superstrat agissant comme une lentille permet de focaliser le champ rayonné par l'antenne et ainsi d'améliorer le gain d'environ 3 dB. Toutefois, ces solutions sont toutes basées sur des conceptions non planaires, donc assez encombrantes pour les systèmes de télécommunication exigeant des systèmes compacts et extra-plats et un effet visuel très convivial.

Pour palier au problème majeur des systèmes complexes d'alimentation dans les réseaux d'antennes, la conception d'antennes directives et compactes basées sur un seul point d'alimentation est devenu un domaine de recherche important et intéressant. Différentes solutions viables basées sur ce concept ont été proposées. Dans un premier temps, des cavités résonantes dans des cristaux photoniques diélectriques unidimensionnelles (1D) ont été utilisées [Cheypte 02]. Par la suite, des structures tridimensionnelles (3D) ont été utilisées, conduisant à des meilleures performances [Temelkuran 00]. Une autre solution intéressante proposée par Enoch est d'utiliser les propriétés de réfraction d'un matériau de faible indice optique afin de réaliser une ultra-réfraction et ainsi conduire à une émission directive [Enoch 02]. On notera que ces solutions, bien qu'elles soient très performantes, sont toutes également basées sur l'utilisation d'un matériau 3D encombrant.

Sinon, la méthode la plus courante pour obtenir une émission directive est évidemment basée sur le mécanisme de la cavité Fabry-Perot [Trentini 56]. Ces cavités ont d'abord été considérées comme assez volumineuses puisqu'elles ont une épaisseur de demi-longueur d'onde [Akalin 02]. Mais récemment, le développement de métasurfaces composites a permis d'enlever la restriction sur l'épaisseur. Par exemple, Feresidis et al. ont montré qu'une cavité Fabry-Perot ayant une épaisseur d'un quart-d'onde peut être conçue à l'aide de surfaces de type Conducteur Magnétique Artificiel (CMA). Ce type de surface introduit un déphasage nul à la réflexion aux ondes incidentes [Feresidis 05]. Les surfaces CMA ont été tout d'abord proposées pour agir comme des Surfaces Haute Impédance (SHI) [Sievenpiper 99]. La SHI est composée de pastilles métalliques périodiquement organisées sur un substrat diélectrique et court-circuitées au plan de masse métallique par des vias, et apparaissent ainsi comme des structures « champignons ».

Dans une bande de fréquences particulière où la phase à la réflexion est comprise entre -90° et $+90^\circ$, cette surface crée des courants images et des réflexions en phase avec la source émettrice contrairement aux plans de masse classiques de type Conducteur Parfaitement Électrique. La SHI permet également la suppression d'ondes de surface qui peuvent se propager sur le plan de masse conventionnelle. Cependant, la SHI de Sievenpiper demande un procédé de fabrication non plane, qui n'est pas appropriée pour une implémentation dans beaucoup de circuits microondes et millimétriques.

L'antenne à cavité proposée par Feresidis était composée de deux surfaces CMA et d'une antenne micro-ruban agissant comme source primaire (alimentation). La première surface CMA a été utilisée comme plan réflecteur avec une phase à la réflexion de 0° . Le second agissait comme une Surface Partiellement Réfléchissantes (SPR) avec une phase à la réflexion égale à 180° . Cette idée a ensuite été poussée plus loin par Zhou et al. [Zhou 05]. En tirant parti des caractéristiques dispersives des métamatériaux, les auteurs ont conçu une cavité sub-longueur d'onde avec une épaisseur inférieure à un dixième de la longueur d'onde.

Il est à noter que antérieurement et en parallèle aux travaux cités ci-dessus sur la réduction de l'épaisseur de la cavité FP, d'autres travaux ont été menés (voire toujours menés) à l'IETR à Rennes et à XLIM à Limoges sur d'autres aspects tels que la réduction des dimensions latérales, le fonctionnement bi-bande et large-bande et la reconfigurabilité en rayonnement [Boutayeb 03, Leger 04, Drouet 07, Hajj 09, Moustafa 09, Serhal 09, Roncière 07, Vu 09, Muhammad 10].

1.1.2 Objectifs et contributions

Dans ce chapitre, à l'aide de métasurfaces composites, faites de grilles capacitatives et inductives, je présente nos travaux récents dans le domaine des antennes à cavité à faible profil et à haut gain. Les travaux sur ce type d'antennes plates ont commencé en 2003 à l'IEF avec la thèse de A. Ourir dans le cadre du projet Télémac [Ourir 06a]. Quand j'ai rejoint le groupe en septembre 2006, j'ai donc travaillé avec A. Ourir et conçu les antennes à cavités dans le cadre du projet ANR « METABIP » pour les bandes DCS 1800, UMTS et WIFI. Par la suite, j'ai donc encadré plusieurs travaux sur ces antennes où nous avons proposé des nouveaux concepts. Les objectifs de notre travail sont multiples :

- proposer des solutions pour l'augmentation de la directivité
Pour cela, nous proposons deux solutions :
 - une cavité blindée par des murs métalliques
 - une cavité excitée par de multiples sources
- concevoir des antennes reconfigurables en fréquence et en dépointage angulaire
- élargir le concept à des cavités conformées sur des objets non linéaires

Je mettrai donc l'accent via la modélisation et la caractérisation sur l'amélioration de la directivité de ces antennes. Je montrerai aussi comment une phase qui quand elle est contrôlée peut être utilisée pour les applications de dépointage de faisceau et de reconfigurabilité de fréquence. Ces résultats ont conduit à la publication d'un chapitre d'ouvrage [Burokur 12]. En dernier lieu, je donnerai un aperçu sur une étude beaucoup plus récente sur les cavités conformées.

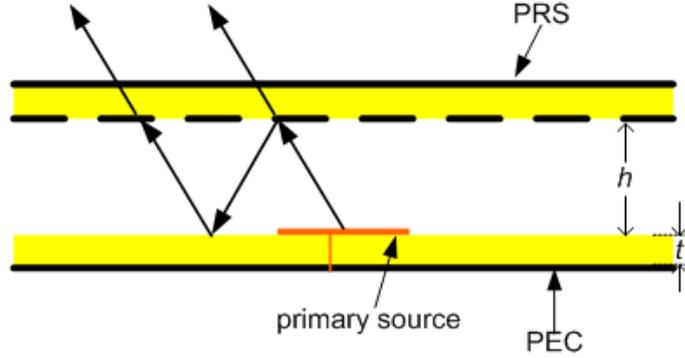


FIGURE 1.2.1: Antenne à cavité Fabry-Perot formée par une source excitatrice et deux surfaces réfléchissantes.

1.2 Étude de métasurfaces passives

Une antenne à cavité Fabry-Perot est formée par une source excitatrice placée entre deux surfaces réfléchissantes, comme illustré sur la Fig. 1.2.1. La cavité est composée d'une surface de type Perfect Electric Conductor (PEC), agissant comme le plan de masse de la source excitatrice et d'une métasurface jouant le rôle d'une fenêtre de transmission appelée Surface Partiellement Réfléchissante (SPR). Suite aux travaux antérieurs de Trentini, un modèle de rayon optique simple permet de décrire les modes de résonance de cavité. Dans la cavité présentée sur la Fig. 1.2.1, des déphasages sont introduits par ces deux réflecteurs ainsi que par la longueur du trajet de l'onde à l'intérieur de la cavité. Avec les réflexions multiples de l'onde émise par l'antenne, une résonance est obtenue lorsque les ondes réfléchies sont en phase après un aller-retour dans la cavité. La condition de résonance pour les ondes se propageant verticalement, peut alors s'écrire :

$$h + t\sqrt{\epsilon_r} = (\phi_{SPR} + \phi_r) \frac{\lambda}{4\pi} \pm N \frac{\lambda}{2} \quad (1.2.1)$$

où ϕ_{SPR} est la phase de réflexion de la SPR, ϕ_r est la phase de réflexion du plan de masse de la source excitatrice, ϵ_r est la permittivité relative du substrat soutenant la source et t est son épaisseur. N est un entier, qualifiant le mode électromagnétique de la cavité. Si les épaisseurs du substrat et de la cavité t et h sont fixées, la longueur d'onde de résonance est déterminée par la somme des phases de réflexion ($\phi_{SPR} + \phi_r$) pour un N fixe. De cette façon, pour une longueur d'onde donnée, l'épaisseur h peut être minimisée en réduisant la somme ($\phi_{SPR} + \phi_r$). Les métasurfaces sont particulièrement intéressantes car elles présentent une résonance *LC*. Cette résonance permet d'avoir une phase de réflexion qui varie de $+180^\circ$ à -180° , en passant par 0° à la fréquence de résonance. En choisissant une fréquence de fonctionnement de cavité au-dessus de la résonance de la métasurface utilisée comme SPR, là où la phase de réflexion est négative, la somme ($\phi_{SPR} + \phi_r$) peut être très petite, conduisant à une épaisseur de cavité très faible.

La métasurface, que nous utilisons comme SPR, est faite d'un métamatériau com-

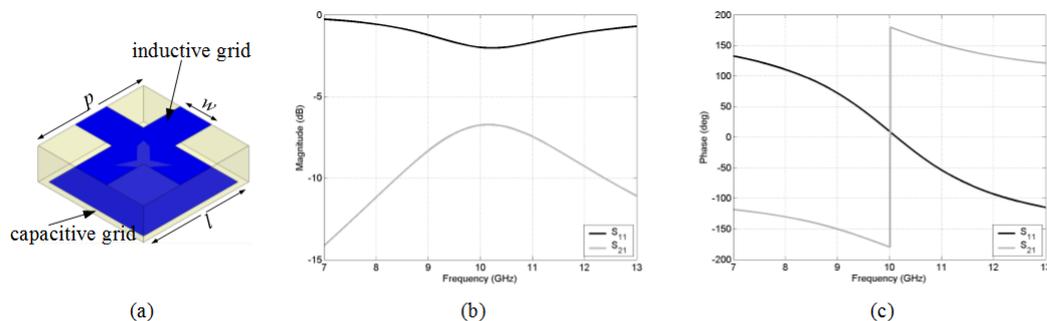


FIGURE 1.2.2: (a) Cellule unité de la SPR. (b)-(c) Réponses en amplitude et en phase.

posite composé d'une grille capacitive et d'une grille inductive imprimées sur les deux faces d'un substrat diélectrique (Fig. 1.2.2(a)). La grille capacitive est formée par un réseau périodique 2D de patches métalliques alors que la grille inductive est formée par un maillage périodique 2D. Pour l'analyse numérique, nous utilisons le logiciel commercial *HFSS* basé sur la méthode des éléments finis afin de présenter les caractéristiques en termes de réflexion et de transmission. Les simulations sont effectuées sur une cellule unité avec des conditions aux limites périodiques appropriées. Les Fig. 1.2.2(b) et 1.2.2(c) montrent les caractéristiques de la métasurface. La métasurface agit comme un filtre résonnant qui présente une phase de réflexion variant entre $+180^\circ$ et -180° . Cette variation permet d'être plus souple dans la conception de cavités plates en choisissant une valeur de phase en-dessous de 0° . On peut aussi noter que la métasurface est hautement réfléchive, condition nécessaire pour une forte directivité.

1.3 Conception d'antennes directives passives

Ici, je présente succinctement l'antenne à cavité issue de la thèse d'A. Ourir avant de présenter les antennes issues de mes études.

La thèse d'A. Ourir a donc débouché sur la conception d'une antenne à cavité FP similaire à celle présentée sur la Fig. 1.2.1 [Ourir 06c]. La SPR conçue présentait une fréquence de résonance d'environ 8 GHz et une phase de réflexion proche de -150° pour les fréquences supérieures à 10 GHz. L'utilisation d'un tel réflecteur a conduit à une cavité sub-longueur d'onde puisque la somme ($\phi_{SPR} + \phi_r$) est très proche de zéro entre 9 GHz et 11 GHz. Une cavité d'épaisseur 1 mm ($\lambda_0/30$) a donc été conçue avec des dimensions latérales de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, où la résonance est atteinte à environ 9,7 GHz. Les diagrammes de rayonnement dans les plans E et H obtenus sont présentés sur la Fig. 1.3.1. La directivité obtenue était de 22 dBi.

Ma participation sur les antennes à cavité passives avait pour but d'augmenter leurs directivités. Pour cela, deux solutions ont été proposées :

- une cavité blindée par des murs métalliques
- une cavité excitée par de multiples sources

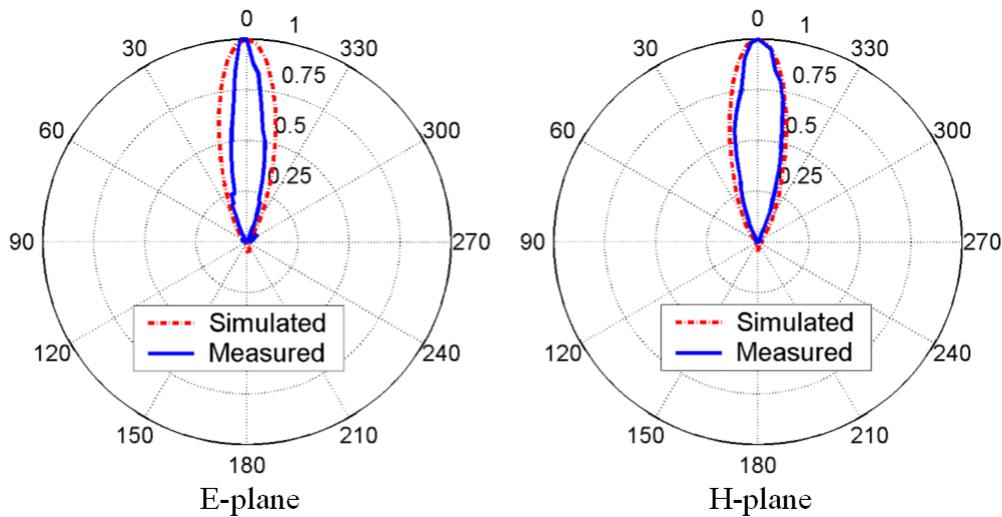


FIGURE 1.3.1: Diagrammes de rayonnement de l'antenne à cavité plate ($\lambda_0/30$) réalisée dans [Ourir 06c].

1.3.1 Cavité blindée par des murs métalliques

L'antenne à cavité blindée par des murs métalliques a été proposée pour une fréquence de fonctionnement de 2,46 GHz pour les liaisons de communications radio point à point dans le cadre du projet ANR « METABIP ». La cavité métallique est similaire à celle présentée sur la Fig. 1.2.1. De plus, quatre murs métalliques sont également fixés sur les faces latérales de façon à améliorer la directivité de l'antenne de cavité tout en gardant des dimensions latérales assez faibles [Burokur 09a]. La réalisation de cette antenne a été faite par Advanten (collaborateur et intervenant dans le projet) sur des substrats de type mousse métallisée.

Les grilles inductives et capacitives sont imprimées sur les faces d'un substrat diélectrique de mousse d'épaisseur de 8 mm ($\epsilon_r = 1,45$, $\tan \delta = 0,0058$). Cette épaisseur est assez suffisante pour fournir une pente relativement douce de la phase, et donc rendre les métamatériaux moins sensibles aux tolérances de fabrication. Les grilles capacitive et inductive de la SPR font $200 \times 200 \text{ mm}^2$, alors que les dimensions latérales du support diélectrique soutenant les grilles ainsi que celle de la cavité ont été augmentées à $250 \times 250 \text{ mm}^2$ ($\approx 2\lambda_0 \times 2\lambda_0$). Cependant, les parois latérales métalliques sont séparées par une distance de 240 mm, comme illustré par la vue de profil de l'antenne sur la Fig. 1.3.2(a). L'épaisseur de la cavité est de $h = 21,5 \text{ mm}$ ($< \lambda_0/5$).

Les résultats numériques présentés sur la Fig. 1.3.2(b) pour les diagrammes de rayonnement dans les plans E et H montrent une directivité de 15,21 dBi. Par rapport à une cavité similaire sans parois métalliques, une amélioration d'environ 3 dB et des lobes secondaires inférieurs sont atteints. Pour atteindre cette même directivité sans parois métalliques, nous aurions dû utiliser une cavité ayant des dimensions latérales proches de $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}^2$. Aussi, la cavité métallique présente dans l'ensemble de plus

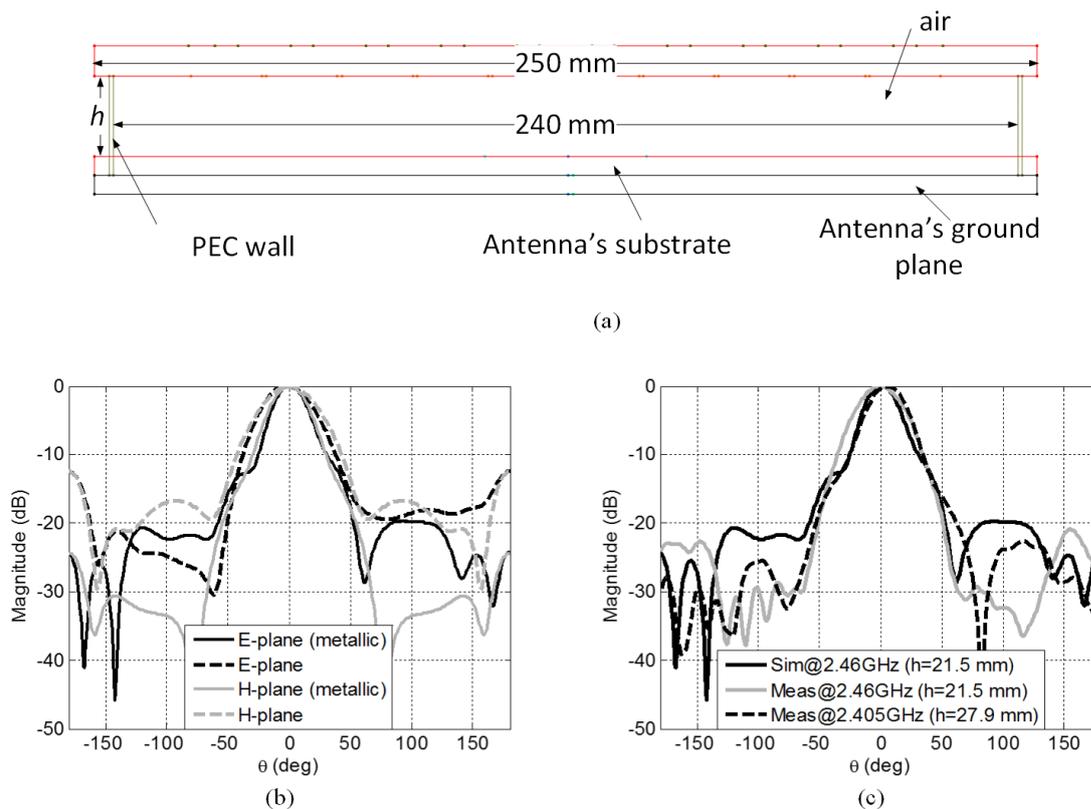


FIGURE 1.3.2: Cavité blindée par des murs métalliques. (a) Principe. (b) Performances simulées. (c) Performances mesurées.

faibles rayonnements arrières en raison du confinement d'énergie par le blindage métallique. Les mesures faites sur le prototype réalisé n'ont toutefois pas montré une résonance comme prévu à 2,46 GHz pour $h = 21,5$ mm mais à 2,49 GHz (Fig. 1.3.2(c)). Ceci est probablement dû aux tolérances de fabrication de l'antenne excitatrice et de la métasurface. Trois autres épaisseurs ($h = 25$ mm, $h = 27,9$ mm et $h = 28,5$ mm) ont montré des performances remarquables. Les différents résultats sont résumés dans le Tab. 1.1. Comme l'épaisseur augmente, la résonance de l'antenne tend vers les fréquences basses. Pour $h = 25$ mm, les mesures montrent une directivité de 12,79 dBi avec des lobes secondaires atteignant un niveau de -26.5 dB. Pour $h = 28,5$ mm, la directivité est de 12,4 dBi. La meilleure directivité (13,4 dBi) est observée à 2,405 GHz pour $h = 27,9$ mm avec un niveau de lobes secondaires à -22.7 dB.

h (mm)	Fréquence de résonance (GHz)	S_{11} (dB)	Directivité (dBi)	Lobes secondaires (dB)
21,5 (sim)	2,46	-29,5	15,3	-19,7
21,5 (exp)	2,49	-8	12,36	-28,7
25 (exp)	2,46	-11	12,79	-26,5
27.9 (exp)	2,405	-20	13,4	-22,7
28.5 (exp)	2,4	-21.5	12,4	-24,4

TABLE 1.1: Performances de la cavité blindée par des murs métalliques.

1.3.2 Cavité excitée par de multiples sources

Comme indiqué précédemment, nous avons proposé une deuxième méthode pour atteindre une plus grande directivité. Elle est basée sur l'utilisation de multiples sources primaires dans la cavité. C'est pourquoi dans cette section, les cavités fonctionnant près de 10 GHz sont alimentées par un réseau de 2×2 patches micro-rubans [Yahiaoui 09, Burokur 09b]. Les quatre patches de dimensions sont alimentées simultanément par une ligne de micro-ruban ; elle-même excitée par un connecteur SMA de 50Ω . L'espacement inter-éléments du réseau de patches joue un rôle important dans la directivité de l'antenne et l'influence de ce paramètre a été étudiée pour des valeurs allant de $0,5\lambda$ et 3λ .

Les diagrammes de rayonnement mesurés dans les plan E et H sont présentés sur la Fig. 1.3.3. Pour un espacement de $0,5\lambda$, une directivité de 19 dBi est obtenue à 8,93 GHz. On peut noter que cette valeur est très proche de celle obtenue dans la cas d'une cavité alimentée par une source unique (voir par exemple [Ourir 06b, Ourir 06c]). Ainsi, il convient de noter qu'à l'inverse des réseaux d'antennes classiques, la directivité n'est pas doublée chaque fois que le nombre de sources est doublé. Plus on augmente l'espacement, plus la directivité augmente. Les performances sont récapitulées dans le Tab. 1.2. L'efficacité d'ouverture passe de 21,7% pour le cas $0,5\lambda$ à 93,5% pour le cas 3λ . La distribution du champ électrique sur la SPR présentée sur la Fig. 1.3.4 permet d'expliquer l'augmentation de la directivité lorsque l'espacement augmente. Une amélioration de 6,35 dBi est observée en comparant les cas $0,5\lambda$ et 3λ . Le champ E est présenté dans un plan horizontal à deux hauteurs différentes dans la cavité, premièrement à $z = 1,5$ qui correspond à la surface interne de la SPR (côté grille capacitive) et ensuite à $z = 2,97$ correspondant à la surface externe de la SPR (côté grille inductive). On peut noter qu'un grand espacement inter-éléments permet d'illuminer une plus grande surface de la SPR. La distribution du champ E sur cette surface est aussi plus uniforme, ce qui permet d'expliquer l'efficacité d'ouverture de 93,54%. Puisque la directivité maximale dépend de la surface illuminée de la SPR, elle est donc plus grande pour la cas 3λ .

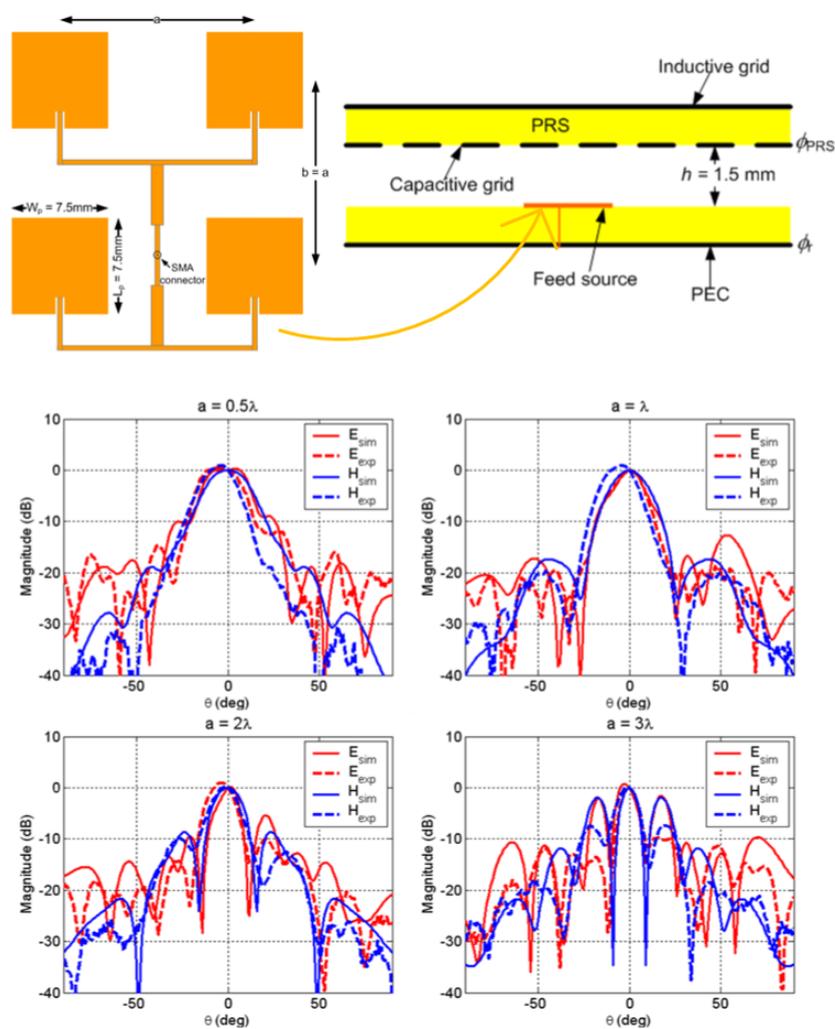


FIGURE 1.3.3: Cavité excitée par de multiples sources primaires. Performances pour différents espacements inter-éléments du réseau de sources.

Espacement (λ)	Directivité maximale (dBi)	Lobes secondaires (dB)
0,5	19 @ 8,93 GHz	-12
1	20,9 @ 9,07 GHz	-19
2	23,21 @ 8,94 GHz	-10
3	25,35 @ 8,96 GHz	-8

TABLE 1.2: Performances des cavités avec différent espacement inter-éléments.

Il est également très important de noter que le niveau des lobes secondaires du réseau de patches est considérablement réduit lorsqu'elles sont introduites dans la cavité. Le

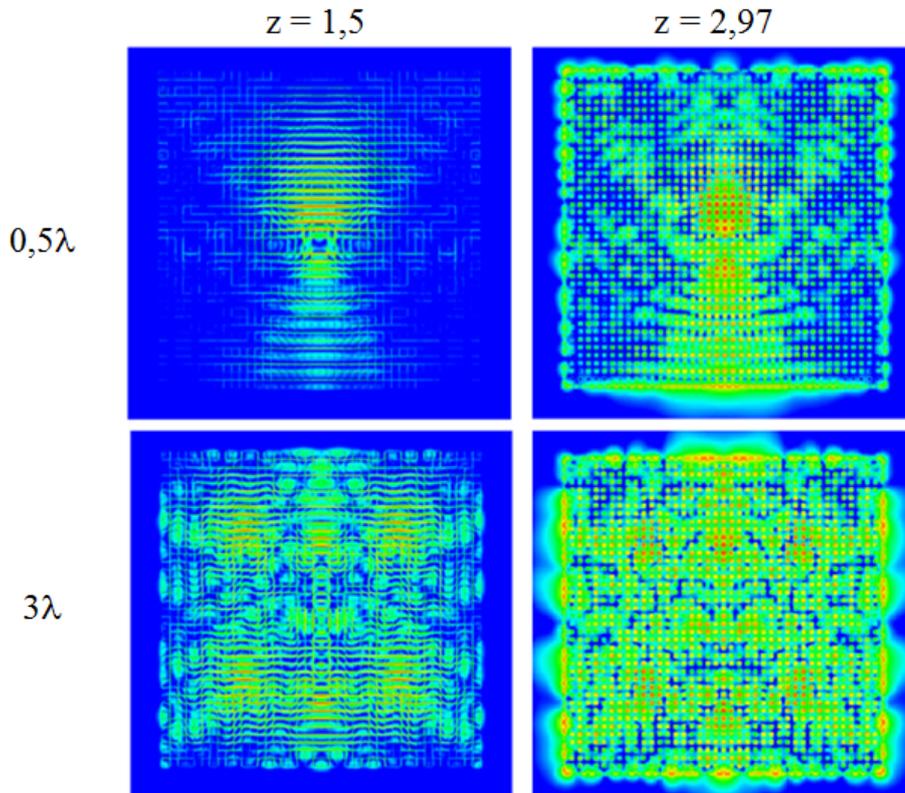


FIGURE 1.3.4: Cartographie du champ E au niveau de la capacitive ($z = 1,5$) et inductive ($z = 2,97$) de la SPR dans des cavités pour le cas $0,5\lambda$ et 3λ .

niveau de lobes secondaires mesurées est assez élevé (~ -8 dB dans le plan H) pour le cas 3λ . Toutefois, ce niveau de lobes est encore faible par rapport au réseau seul. Il est bien connu qu'un espacement inter-éléments d'un réseau supérieur à λ conduit à des lobes de niveau élevé ainsi qu'à l'apparition de lobes de réseau. La diminution du niveau de lobes secondaires de la source primaire par la cavité s'explique par le fait que la SPR agit comme un réseau d'un très grand nombre de micro-antennes avec un espacement très faible devant la longueur d'onde.

1.4 Étude de métasurfaces non-uniformes et actives

Pour des performances de dépointage de faisceau et d'agilité en fréquence dans une antenne à cavité, nous avons travaillé sur la conception de métasurfaces non-uniformes, passives dans un premier temps, puis actives via l'intégration d'éléments localisés tels que des diodes varicaps.

Dans le cas passif, nous avons la possibilité d'agir sur les deux grilles, capacitive et inductive. La Fig. 1.4.1 montre la cellule unitaire de la métasurface. On peut noter que

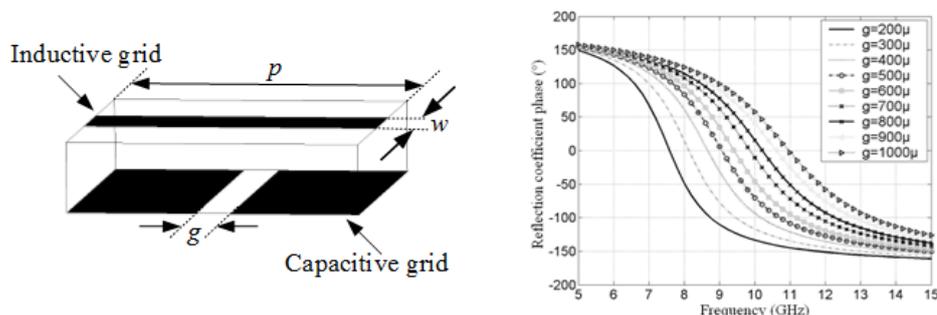


FIGURE 1.4.1: Métasurface non-uniforme passive où on agit sur la grille capacitive.

l'espacement g dans la grille capacitive joue un rôle crucial dans la capacité et, par conséquent, la fréquence de résonance de la métasurface. En changeant la valeur de g et en conservant tous les autres paramètres géométriques inchangés, la capacité de la métasurface changera également. En conséquence, la phase du coefficient de réflexion variera. Ce comportement est illustré par les résultats numériques sur la Fig. 1.4.1. Nous pouvons noter que la variation de g entraîne un décalage de la fréquence de résonance. Une augmentation de la valeur de g entraîne une diminution de la valeur de la capacité créée entre deux cellules et donc un décalage de la résonance vers des fréquences plus élevées. À une fréquence spécifique, la phase augmente avec une augmentation de g . Ces résultats montrent qu'il est possible de concevoir une SPR avec une variation continue de g , ce qui entraîne une variation locale des caractéristiques de phase. Si l'on considère chaque gap comme une fente rayonnante, une analogie peut alors se faire avec un réseau de plusieurs antennes à fentes avec une différence de phase régulière. La métasurface à phase localement variable peut être ensuite appliquée pour un dépointage angulaire du faisceau [Ourir 07b, Ourir 09].

De la même façon, nous avons conçu des métasurfaces à phase localement variable en agissant sur la grille inductive (Fig. 1.4.2). Afin de faire varier la fréquence de résonance de la métasurface, nous appliquons une variation sur la largeur w de la piste micro-ruban [Ghasemi 13a, Ghasemi 13b]. Les résultats montrent effectivement une fréquence de résonance de 6,1 GHz à 8,6 GHz pour w allant de 0,5 mm à 4,5 mm.

Pour les métasurfaces non-uniformes actives, nous avons intégré des diodes varicaps sur la grille capacitive, comme illustré sur la Fig. 1.4.3 [Burokur 10, Burokur 11]. Les diodes varicaps suivant la tension de polarisation présente une capacité différente. Cette métasurface permet de présenter deux caractéristiques. En changeant simultanément toutes les tensions, on peut dans ce cas rendre la surface reconfigurable en fréquence, ce qui est intéressant dans les cas des antennes agiles en fréquence. Par contre, si nous appliquons un gradient de tension le long de la surface, on se retrouve dans ce cas avec une surface présentant une variation locale de la phase.

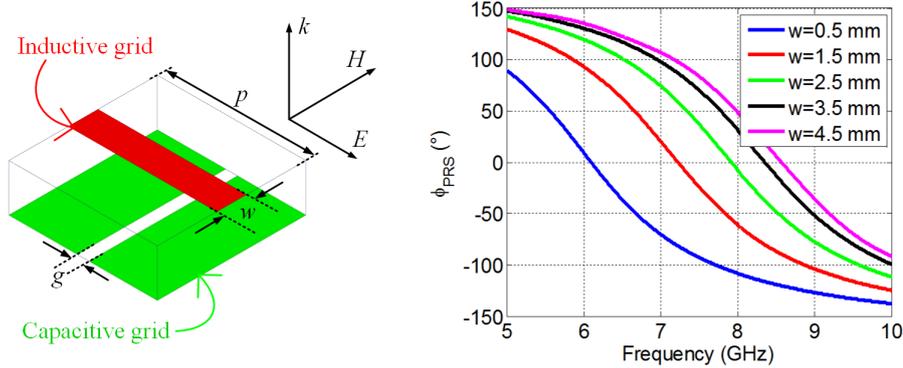


FIGURE 1.4.2: Métasurface non-uniforme passive où on agit sur la grille inductive.

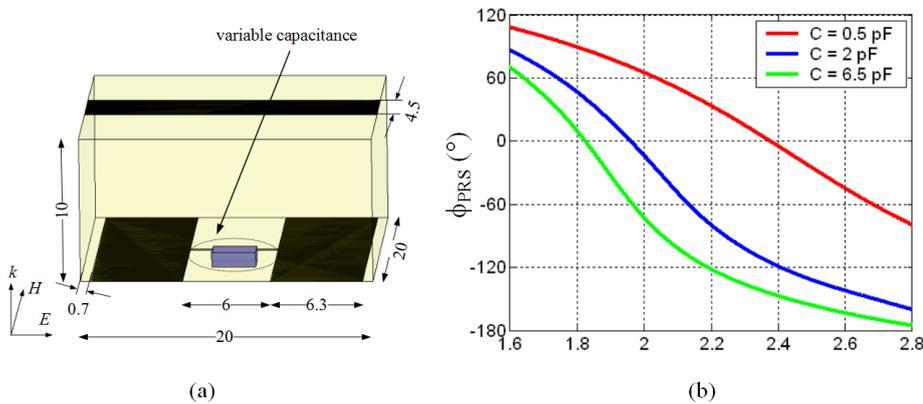


FIGURE 1.4.3: Métasurface non-uniforme active nécessitant l'intégration de diodes varicaps.

1.5 Conception d'antennes directives reconfigurables

Les métasurfaces présentées dans la section 1.4 sont utilisées dans des antennes à cavités reconfigurables.

1.5.1 Dépointage de faisceau

Les métasurfaces non-uniformes passives ont été par exemple appliquées pour la conception d'antennes présentant un dépointage angulaire du faisceau sans pour autant utiliser plusieurs sources rayonnantes et un déphaseur. Dans ce cas, la métasurface doit présenter un gradient de phase le long de sa surface. Le principe et les résultats clés sont donnés sur la Fig. 1.5.1. La 1.5.1(a) montre une cavité FP utilisant une SPR avec une phase qui varie le long de la surface via une structuration non-uniforme de la grille capacitive. En faisant varier graduellement la taille du gap capacitif, nous sommes capables d'avoir une phase

différente en chaque point de la SPR, ce qui permet donc de produire un dépointage angulaire du faisceau [Ourir 07b, Ourir 09]. Les résultats montrent un dépointage allant jusqu'à 20° . Nous pouvons aussi très bien appliquer la variation de phase sur la grille inductive, comme illustré sur la Fig. 1.5.1(b). Comme dans [Burokur 09b], nous avons montré que dans une cavité sub-longueur d'onde, la SPR n'est illuminée qu'au-dessus de la source primaire, nous avons appliqué une variation de phase que sur la partie centrale de la SPR comme présenté sur la Fig. 1.5.1(b) [Ghasemi 13a, Ghasemi 13b]. Cette variation de phase sur la grille inductive nous a permis d'atteindre un dépointage proche de 60° .

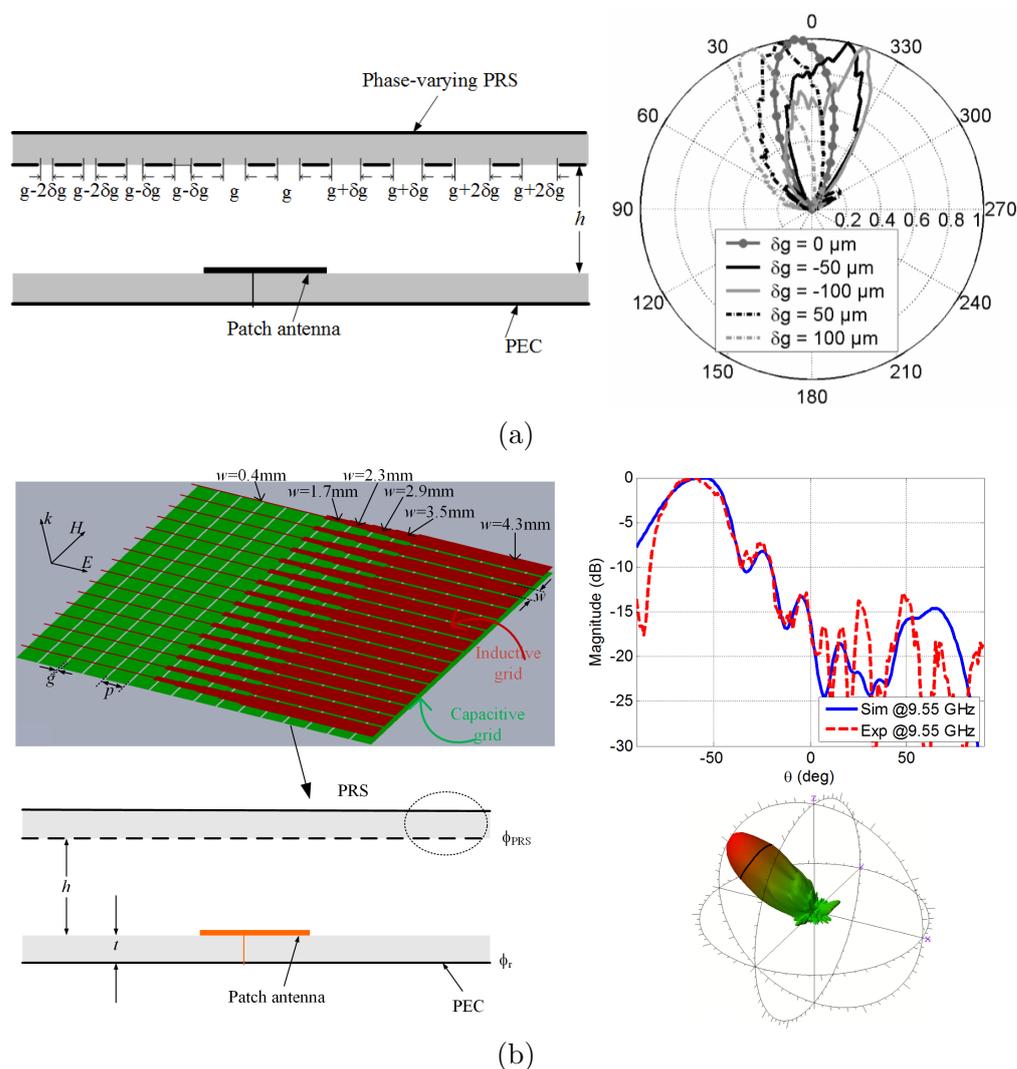


FIGURE 1.5.1: Métasurface non-uniforme passive utilisée comme SPR dans une antenne à cavité. (a) Variation de la capacitance. (b) Variation de l'inductance.

1.5.2 Agilité en fréquences

Comme introduit dans la section 1.4, des diodes varicaps peuvent être utilisées comme capacitance variable. Les diodes varicaps utilisées dans cette étude sont des BB857 d'Infineon Technologies avec une plage de capacitance allant de 0,52 pF à 6,6 pF.

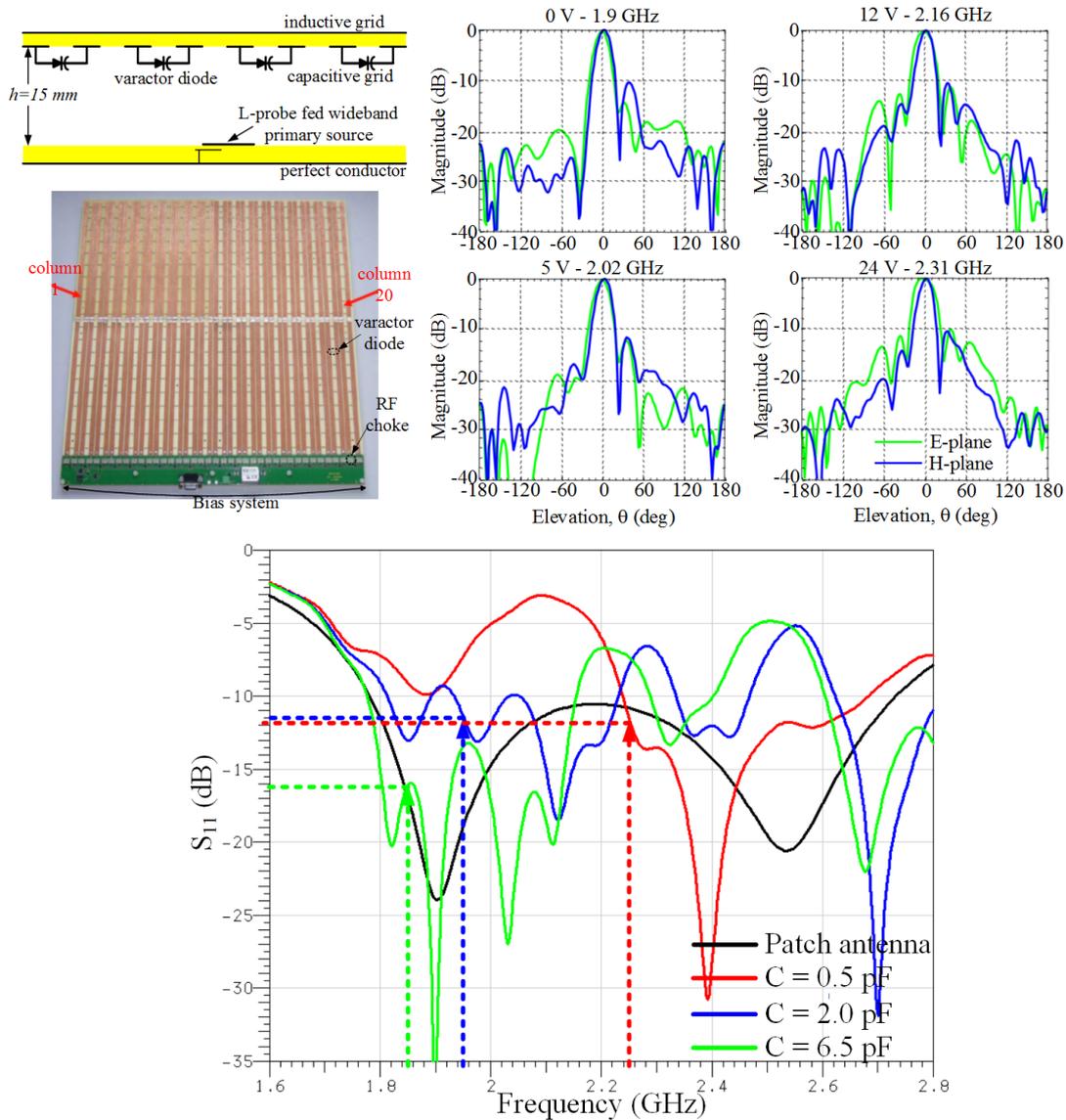


FIGURE 1.5.2: Métasurface non-uniforme active utilisée dans une antenne à cavité agile en fréquence.

Il y a deux notions importantes dans une cavité FP :

- la fréquence de directivité maximale est régie par l'épaisseur de la cavité (condition

de résonance de l'Eq. 1.2.1)

- la fréquence de résonance de la cavité dépend fortement de celle de la source primaire.

Ainsi, quand nous utilisons une SPR active pour changer la fréquence de directivité maximale, il faut s'assurer que la source excitatrice a un fonctionnement large-bande pour que la cavité soit bien adaptée aux différentes fréquences de directivité maximale [Burokur 10, Burokur 11]. Pour cette raison, une source large-bande a été utilisée dans la cavité.

Comme nous le montre la Fig. 1.5.2, l'antenne présente une agilité en fréquence de 1,9 GHz à 2,31 GHz pour une tension de polarisation des diodes de 0 V à 24 V. Il est à noter qu'ici le but n'est pas de créer un gradient de phase le long de la SPR, mais plutôt une reconfigurabilité de la fréquence de résonance de la SPR en changeant simultanément toutes les tensions de polarisation des diodes. Cette antenne a été réalisée dans le cadre du projet ANR « METABIP » dans le but de pouvoir fonctionner dans les bandes DCS 1800, UMTS et WIFI .

D'autres travaux sont actuellement en cours sur cette métasurface active pour l'application de dépointage angulaire. Cependant, la diode utilisée ne semble pas être la mieux appropriée pour la bande de fréquences ciblée. D'autres réalisations sont prévues dans le cadre d'un projet industriel avec ASTRIUM à 2,2 GHz.

1.6 Conception d'antennes conformées

De nombreuses applications dans l'aéronautique et le transport nécessitent des antennes non planes. Les antennes sur des structures conformées jouent un rôle considérable dans les systèmes de communications modernes, les antennes intelligentes, les antennes à dépointage de faisceau, les systèmes radar et les applications aérospatiales. Compte tenu des contraintes aérodynamiques, les missiles et les véhicules à haute vitesse nécessitent des antennes conformées sur leurs surfaces. En général, une antenne conformée est cylindrique ou sphérique, avec les éléments rayonnants montés sur ou intégrés dans la surface courbée. Ces antennes conformées offrent divers avantages tels qu'une couverture à 360° afin d'assurer des communications sans coupure, un niveau minimal de rayonnements non désirés, un poids faible et une possibilité d'obtenir des gains importants. Lorsque la surface courbée a un rayon beaucoup plus grand que la longueur d'onde de travail, les analyses numériques peuvent omettre l'influence de la courbure sur l'élément rayonnant. Toutefois, lorsque le rayon de courbure est plus faible ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, l'influence de la courbure sur l'élément rayonnant doit être prise en compte et intégrée dans la conception.

Dans cette section, je présente une antenne à cavité conformée pour la bande WIFI à 5,7 GHz et qui doit être montée sur le toit d'un train. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR « METAPHORT ». Le but ici est de compenser la phase sur la SPR conformée de sorte qu'elle présente les mêmes caractéristiques à celle d'une SPR plane. Le principe est illustré sur la Fig. 1.6.1 [Germain 13a, Germain 13b].

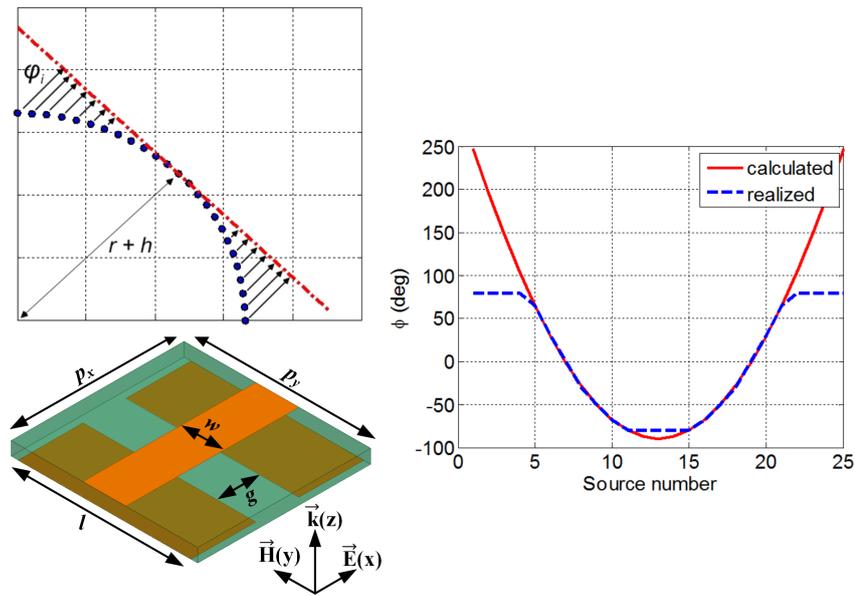


FIGURE 1.6.1: Principe de la compensation de phase dans une cavité conformée.

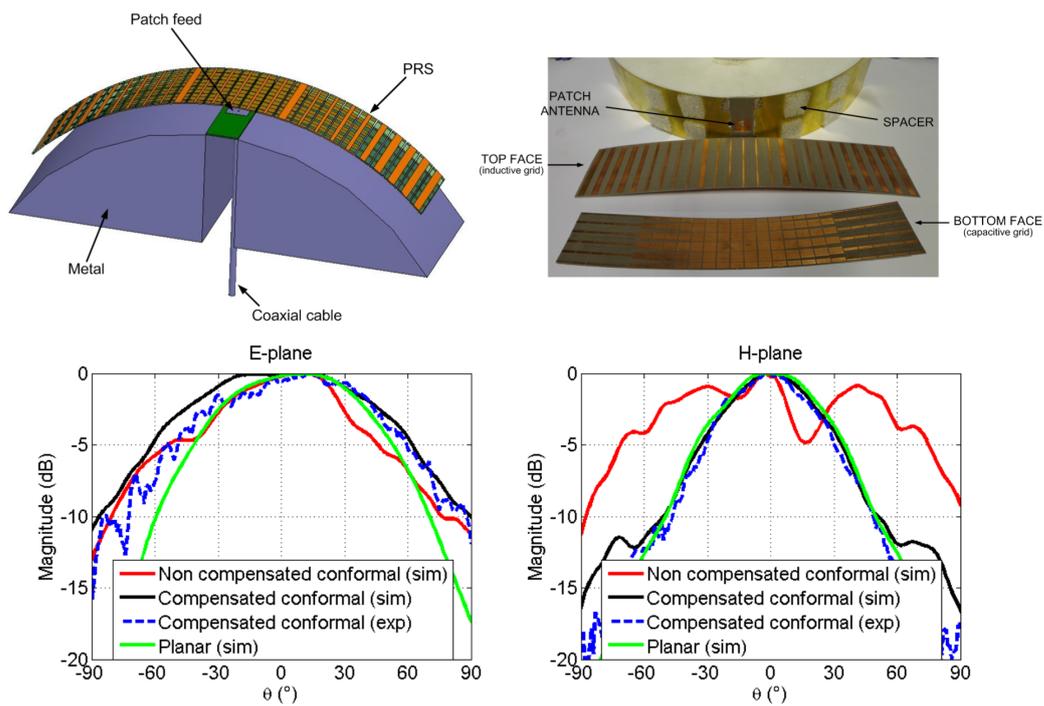


FIGURE 1.6.2: Antenne à cavité conformée réalisée et diagrammes de rayonnement associés.

Quand la SPR est éclairée par la source dans une antenne à cavité FP, les cellules résonnantes LC de la SPR plane peuvent être considérées comme un réseau de micro-antennes rayonnant en phase. Toutefois, les cellules résonnantes d'un réflecteur courbé ne produisent pas de rayonnement en phase. Donc, pour obtenir une émission en phase, le réseau courbé doit présenter une distribution de phase de sorte que la SPR rayonne comme une qui est plane. Chaque cellule doit ainsi présenter un déphasage pour compenser la distance entre la surface courbée et la surface plane. Le déphasage calculé par la relation $\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{|ax_i + by_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ est présenté sur la Fig. 1.6.1.

La métasurface non-uniforme réalisée est composée de cellules résonnantes LC comme nous le montre la Fig. 1.6.1. Elle est conçue pour présenter la réponse de phase ayant une allure parabolique. Elle est conformée sur un quart de cylindre de rayon 152 mm (Fig. 1.6.2). Les diagrammes de rayonnement présentés montrent clairement une amélioration dans le plan H par rapport au cas avec une SPR sans compensation de phase. La Fig. 1.6.2 montrent aussi que la cavité conformée présente des diagrammes de rayonnement qui sont très proches d'une cavité plane, ce qui confirme que l'intégration d'une compensation de phase dans la SPR a permis de rétablir une émission en phase d'une antenne conformée.

1.7 Conception de radômes conformés et reconfigurables

Dans cette section, nous ne parlons pas de notion de SPR ou d'antenne à cavité, mais plutôt de fenêtre électromagnétique utilisé pour soit laisser passer ou réfléchir une onde électromagnétique. Pour cela, nous utilisons une surface sélective en fréquence (SSF) faite d'un réseau de fils métalliques.

Les SSF contrôlables sont intéressantes pour une variété d'applications telles que les antennes, les écrans radiofréquences et les filtres [Maci 05]. Plusieurs études ont été réalisées sur des SSF électroniquement actives dans le domaine des microondes où leurs applications pour des fenêtres électromagnétiques et les antennes ont été démontrées [de Lustrac 99, de Lustrac 01]. Le principal avantage de ces structures réside dans la grande facilité de contrôle directionnel continu de transmission et de réglage de la fréquence, qui dépend des paramètres géométriques de la structure. Nous avons utilisé une SSF pour concevoir un radôme, qui peut être par la suite électroniquement contrôlable, opérant autour de 10 GHz. Dans la littérature, des SSF ont été proposées pour concevoir des radômes [Munk 05, Poilasne 00b, Chang 93, Philips 95, Chang 96, Vardaxoglou 96, Cahill 01]. Cependant, nous n'avons pas vu d'études sur les radômes à SSF conformées.

La Fig. 1.7.1 montre le radôme conformable sur une forme sphérique étudié [Haché 09]. Cette forme correspond au sommet du radôme réel d'un avion ATR 42, avec un rayon maximum $R = 16,5$ cm. Les SSF que nous avons étudiées sont toutes composées d'une grille unidimensionnelle de fils de cuivre parallèles de largeur $w = 1$ mm régulièrement disposées sur la forme sphérique avec une période de projection $a = 1$ cm sur le plan horizontal (plan xOy). Cette structure a deux plans de symétrie (xOz et yOz) qui permettent de simplifier la simulation. Une antenne cornet en bande X est utilisée comme source rayonnante. Deux configurations de commutation ont été testées à l'aide de structures avec des fils continus ou discontinus :

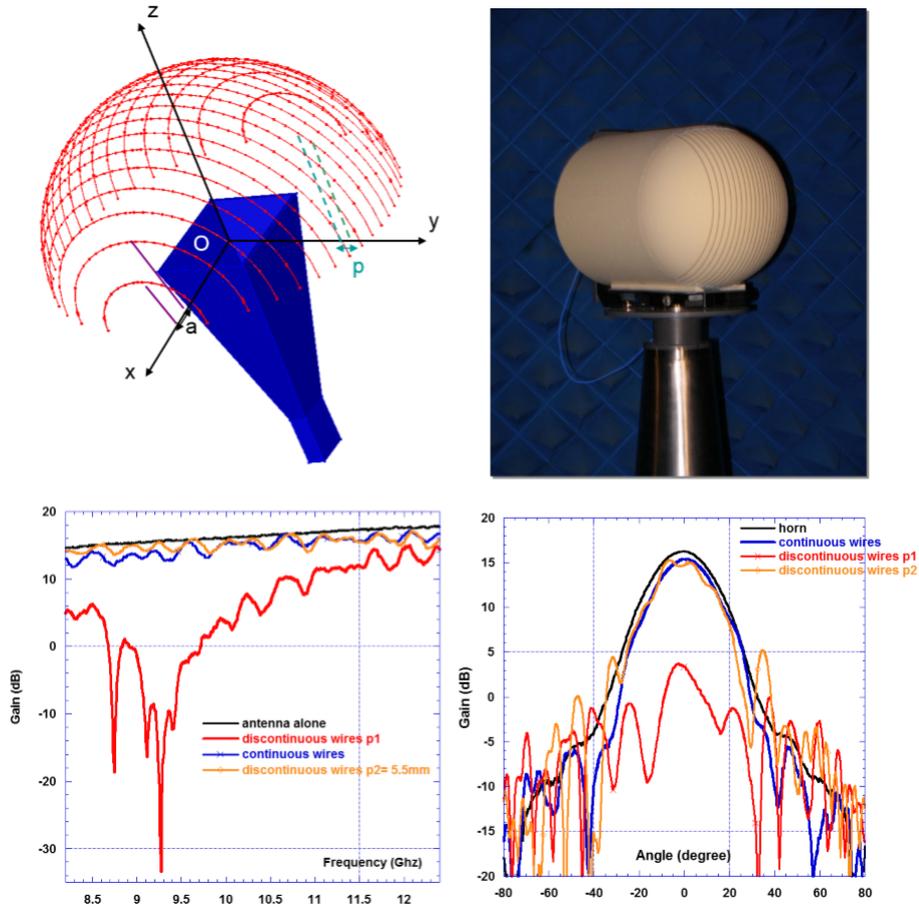


FIGURE 1.7.1: Radôme à base d'une SSF composée de fils métalliques et résultats associés.

- Configuration 1 : commutation entre fils continus et discontinus
 Un réseau de fils continus présentant les caractéristiques d'un filtre passe-haut, nous avons travaillé avec des paramètres géométriques nous permettant d'avoir la fréquence de coupure en-dessous de notre fréquence de travail de 10 GHz. Dans ce cas, la surface est considérée comme transparente à une onde électromagnétique incidente. Le réseau de fils discontinus est donc utilisé comme surface opaque ou réfléchissante.
- commutation entre fils discontinus de périodes différentes
 En utilisant des périodicités différentes sur deux réseaux de fils discontinus, nous sommes capables de faire varier la fréquence de bande interdite. Ainsi à la fréquence désirée, un réseau peut être transparent et l'autre réfléchissant.

Les résultats présentés sur la Fig. 1.7.1 montre une commutation de l'état à 9,3 GHz. L'atténuation du signal est supérieure à 20 dB.

Pour une version électronique de cette commutation, des diodes PIN pourraient être utilisées dans la configuration 1. Dans ce cas, une SSF composée uniquement de fils discontinus et avec des diodes PIN insérées dans les coupures, nous sommes capables de présenter une surface transparente lorsque les diodes sont polarisées et une surface réfléchissante lorsqu'elles ne le sont pas. Ce travail a été financé par la Fondation EADS et a été fait en collaboration avec EADS IW et la DGA.

1.8 Conclusion et perspectives

Les travaux rapportés dans ce chapitre concernent l'utilisation des métasurfaces dans les antennes et les radômes. En ce qui concerne les antennes, j'ai présenté les différentes performances sur lesquelles nous avons travaillé et mis en œuvre. Dans chaque cas, j'ai présenté les résultats majeurs obtenus. Ces antennes de type cavité Fabry-Perot ont été conçues pour répondre à plusieurs besoins dans le cadre de projets. Les besoins recensés et caractéristiques recherchées ont été :

- profil plat
- grande directivité
- agilité en fréquence
- dépointage angulaire du faisceau
- conformable

Suivant le besoin, une métasurface utilisée comme réflecteur a été conçue. Nous avons entre-autre montré comment une non-uniformité de la structuration des cellules de la métasurface peut être utilisée soit pour obtenir un dépointage angulaire ou une compensation de phase.

En dernier, nous avons présenté un radôme conformé sphériquement à base d'une SSF. Ce radôme est fait d'un réseau de fils métalliques et permet de passer d'un état de transmission à un état de réflexion du signal. L'originalité de ces travaux réside dans le fait que nous avons contribué activement à proposer de nouvelles caractéristiques surtout dans le domaine des antennes à cavité Fabry-Perot.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus de recherches personnelles à la suite de la thèse d'A. Ourir et d'un ensemble de stages. Les travaux ont été effectués dans le cadre de projets financés par l'ANR et la fondation EADS. Ils ont fait l'objet d'un chapitre d'ouvrage et de nombreuses publications dans des revues et des conférences. Par conséquent, je remercie très sincèrement les étudiants qui ont participé à ces travaux, les collaborateurs et aussi les financeurs.

D'autres travaux sur les antennes à cavité sont actuellement en cours dans le cadre d'un projet industriel avec ASTRIUM pour un dépointage angulaire électronique du faisceau à $\pm 60^\circ$. Nous avons aussi commencé une collaboration avec la PME Kyemo, qui fabrique et commercialise des antennes de station de base pour la téléphonie mobile. Un projet FUI est en cours de dépôt pour la réalisation d'une antenne pour la LTE-Advanced (4^{ème} génération).

Bibliographie

- [Akalin 02] T. Akalin, J. Danglot, O. Vanbesien & D. Lippens. *A highly directive dipole antenna embedded in a Fabry-Perot type cavity*. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol. 12, no. 2, pages 48–50, 2002.
- [Attia 09] H. Attia, L. Yousefi, M.M. Bait-Suwaitam, Muhammed S. Boybay & Omar M. Ramahi. *Enhanced-Gain Microstrip Antenna Using Engineered Magnetic Superstrates*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 8, pages 1198–1201, 2009.
- [Balanis 08] C.A. Balanis. *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [Bernard 11] L. Bernard, G. Chertier & R. Sauleau. *Wideband Circularly Polarized Patch Antennas on Reactive Impedance Substrates*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 10, pages 1015–1018, 2011.
- [Boutayeb 03] H. Boutayeb. *Etude des structures périodiques planaires et conformes associées aux antennes. Application aux communications mobiles*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2003.
- [Burokur 05] S.N. Burokur, M. Latrach & Serge Toutain. *Theoretical investigation of a circular patch antenna in the presence of a left-handed medium*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 4, pages 183–186, 2005.
- [Burokur 09a] S.N. Burokur, A. Ourir, J.-P. Daniel, P. Ratajczak & A. de Lustrac. *Highly directive ISM band cavity antenna using a bi-layered metasurface reflector*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 51, no. 6, pages 1393–1396, 2009.
- [Burokur 09b] S.N. Burokur, R. Yahiaoui & A. de Lustrac. *Subwavelength metamaterial-based resonant cavities fed by multiple sources for high directivity*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 51, no. 8, pages 1883–1888, 2009.
- [Burokur 10] S. N. Burokur, J.-P. Daniel, P. Ratajczak & A. de Lustrac. *Tunable bilayered metasurface for frequency reconfigurable directive emissions*. Applied Physics Letters, vol. 97, no. 6, page 064101, 2010.
- [Burokur 11] S.N. Burokur, J.-P. Daniel, P. Ratajczak & A. de Lustrac. *Low-profile frequency agile directive antenna based on an active metasurface*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 53, no. 10, pages 2291–2295, 2011.

- [Burokur 12] S.N. Burokur, A. Ourir, A. de Lustrac & R. Yahiaoui. Metamaterial, chapitre Metasurfaces for high directivity antenna applications, pages 533–556. InTech, 2012.
- [Cahill 01] B.M. Cahill & E.A. Parker. *Field switching in an enclosure with active FSS screen*. Electronics Letters, vol. 37, no. 4, pages 244–245, 2001.
- [Chang 93] T.K. Chang, R.J. Langley & E.A. Parker. *An active square loop frequency selective surface*. Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, vol. 3, no. 10, pages 387–388, 1993.
- [Chang 96] T.K. Chang, R.J. Langley & E.A. Parker. *Active frequency-selective surfaces*. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, vol. 143, no. 1, pages 62–66, 1996.
- [Chang 01] C.C. Chang, Y. Qian & T. Itoh. *Enhanced forward coupling phenomena between microstrip lines on periodically patterned ground plane*. In IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2001.
- [Chang 03] C.C. Chang, Y. Qian & T. Itoh. *Analysis and applications of uniplanar compact photonic bandgap structures*. Progress in Electromagnetic Research, vol. 41, pages 211–235, 2003.
- [Chen 06] H. Chen, B.-I. Wu, L. Ran, T.M. Grzegorzczuk & J.A. Kong. *Controllable left-handed metamaterial and its application to a steerable antenna*. Applied Physics Letters, vol. 89, no. 5, page 053509, 2006.
- [Cheype 02] C. Cheype, C. Serier, M. Thevenot, T. Monediere, A. Reineix & B. Jeccko. *An electromagnetic bandgap resonator antenna*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 9, pages 1285–1290, 2002.
- [Collardey 05] S. Collardey, A.-C. Tarot, P. Pouliguen & K. Mahdjoubi. *Use of electromagnetic band-gap materials for RCS reduction*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 44, no. 6, pages 546–550, 2005.
- [Costa 10] F. Costa & A. Monorchio. *Multiband electromagnetic wave absorber based on reactive impedance ground planes*. Microwaves, Antennas Propagation, IET, vol. 4, no. 11, pages 1720–1727, 2010.
- [de Lustrac 99] A. de Lustrac, F. Gadot, S. Cabaret, J.-M. Lourtioz, T. Brillat, A. Priou & E. Akmansoy. *Experimental demonstration of electrically controllable photonic crystals at centimeter wavelengths*. Applied Physics Letters, vol. 75, no. 11, pages 1625–1627, 1999.
- [de Lustrac 01] A. de Lustrac, F. Gadot, E. Akmansoy & T. Brillat. *High-directivity planar antenna using controllable photonic bandgap material at microwave frequencies*. Applied Physics Letters, vol. 78, no. 26, pages 4196–4198, 2001.

- [Dong 11] Y. Dong, H. Toyao & T. Itoh. *Compact Circularly-Polarized Patch Antenna Loaded With Metamaterial Structures*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 59, no. 11, pages 4329–4333, 2011.
- [Dong 12] Y. Dong, H. Toyao & T. Itoh. *Design and Characterization of Miniaturized Patch Antennas Loaded With Complementary Split-Ring Resonators*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 2, pages 772–785, 2012.
- [Drouet 07] J. Drouet. *Méthodes d'analyse électromagnétiques spécifiques à la conception des antennes à résonateur BIE multi sources*. PhD thesis, Université de Limoges, 2007.
- [Enoch 02] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin & P. Vincent. *A Metamaterial for Directive Emission*. Phys. Rev. Lett., vol. 89, page 213902, 2002.
- [Feresidis 05] A.P. Feresidis, G. Goussetis, Shenhong W. & J.C. Vardaxoglou. *Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 1, pages 209–215, 2005.
- [Germain 13a] D. Germain, D. Seetharamdoo, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Phase-compensated metasurface for a conformal microwave antenna*. Applied Physics Letters, vol. 103, no. 12, page 124102, 2013.
- [Germain 13b] D. Germain, D. Seetharamdoo, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Thin conformal directive Fabry-Pérot cavity antenna*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 12, pages 926–929, 2013.
- [Ghasemi 13a] A. Ghasemi, S.N. Burokur, A. Dhouibi & A. de Lustrac. *High Beam Steering in Fabry-Pérot Leaky-Wave Antennas*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 12, pages 261–264, 2013.
- [Ghasemi 13b] A. Ghasemi, S.N. Burokur, A. Dhouibi & A. de Lustrac. *Inductive-varying grid for highly beamsteerable cavity antennas*. Electronics Letters, vol. 49, no. 5, pages 319–321, 2013.
- [Haché 09] S. Haché, S.N. Burokur, A. de Lustrac, F. Gadot, P. Cailleu & G.-P. Piau. *Principles and applications of a controllable electromagnetic band gap material to a conformable spherical radome*. The European Physical Journal Applied Physics, vol. 46, 6 2009.
- [Hajj 09] M. Hajj. *Conception, réalisation et caractérisation de nouveaux types d'antennes sectorielles à base de matériaux BIE métalliques pour télécommunications terrestres*. PhD thesis, Université de Limoges, 2009.

- [Itou 04] A. Itou, O. Hashimoto, H. Yokokawa & K. Sumi. *A fundamental study of a thin $\lambda/4$ wave absorber using FSS technology*. Electronics and Communications in Japan (Part I : Communications), vol. 87, no. 11, pages 77–86, 2004.
- [Jackson 85] D.R. Jackson & N.G. Alexopoulos. *Gain enhancement methods for printed circuit antennas*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 33, no. 9, pages 976–987, 1985.
- [Latrach 10] M. Latrach, H. Rmili, C. Sabatier, E. Seguenot & S. Toutain. *Design of a new type of metamaterial radome for low frequencies*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 52, no. 5, pages 1119–1123, 2010.
- [Leger 04] L. Leger. *Nouveaux développements autour des potentialités de l'antenne BIE planeaire*. PhD thesis, Université de Limoges, 2004.
- [Li 12] M. Li, S. Xiao, Y.-Y. Bai & B.-Z. Wang. *An Ultrathin and Broadband Radar Absorber Using Resistive FSS*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 11, pages 748–751, 2012.
- [Ma 09] H.F. Ma, X. Chen, H.S. Xu, X.M. Yang, W.X. Jiang & T.J. Cui. *Experiments on high-performance beam-scanning antennas made of gradient-index metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 95, no. 9, page 094107, 2009.
- [Maci 05] S. Maci, M. Caiazzo, A. Cucini & M. Casaletti. *A pole-zero matching method for EBG surfaces composed of a dipole FSS printed on a grounded dielectric slab*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 1, pages 70–81, 2005.
- [Marconi 19] G. Marconi & C.S. Franklin. *Reflector for use in wireless telegraphy and telephony*, April 1919. <http://www.uspto.gov/>
- [Mosallaei 04] H. Mosallaei & K. Sarabandi. *Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 52, no. 9, pages 2403–2414, 2004.
- [Moustafa 09] L. Moustafa. *Conception d'antennes à Bande Interdite Electromagnétique large bande et multibandes à base de métasurfaces*. PhD thesis, Université de Limoges, 2009.
- [Muhammad 10] S.A. Muhammad. *Etude et conception d'antennes à résonateur de Pérot-Fabry compacts pour les applications spatiales*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2010.
- [Munk 05] B. Munk. *Frequency selective surfaces : Theory and design*. John Wiley & Sons, Inc, 2005.

- [Nakano 04] H. Nakano, M. Ikeda, K. Hitosugi & J. Yamauchi. *A spiral antenna sandwiched by dielectric layers*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 52, no. 6, pages 1417–1423, 2004.
- [Ourir 06a] A. Ourir. *Applications de matériaux à bandes interdites photoniques et de métamatériaux en télécommunications*. PhD thesis, Université Paris Sud 11, 2006.
- [Ourir 06b] A. Ourir, A. de Lustrac & J.-M. Lourtioz. *All-metamaterial-based subwavelength cavities ($\lambda/60$) for ultrathin directive antennas*. Applied Physics Letters, vol. 88, no. 8, page 084103, 2006.
- [Ourir 06c] A. Ourir, A. de Lustrac & J.-M. Lourtioz. *Optimization of metamaterial based subwavelength cavities for ultracompact directive antennas*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 48, no. 12, pages 2573–2577, 2006.
- [Ourir 07b] A. Ourir, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Phase-varying metamaterial for compact steerable directive antenna*. Electronics Letters, vol. 43, no. 9, pages 493–494, 2007.
- [Ourir 09] A. Ourir, S.N. Burokur, R. Yahiaoui & A. de Lustrac. *Directive metamaterial-based subwavelength resonant cavity antennas - Applications for beam steering*. Comptes Rendus Physique, vol. 10, no. 5, pages 414–422, 2009.
- [Philips 95] B. Philips, E.A. Parker & R.J. Langley. *Active FSS in an experimental horn antenna switchable between two beamwidths*. Electronics Letters, vol. 31, no. 1, pages 1–2, 1995.
- [Poilasne 00a] G. Poilasne, P. Pouliguen, K. Mahdjoubi, L. Desclos, P. Gélén & C. Terret. *Metallic photonic band-gap materials (MPBG) as angular selective reflector or radome : Application to antenna grating lobe reduction*. Annales Des Télécommunications, vol. 55, no. 5-6, pages 207–215, 2000.
- [Poilasne 00b] G. Poilasne, P. Pouliguen, K. Mahdjoubi, L. Desclos & C. Terret. *Active metallic photonic band-gap materials (MPBG) : experimental results on beam shaper*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 1, pages 117–119, 2000.
- [Roncière 07] O. Roncière. *Antennes à bande interdite électromagnétique et à cavité Fabry-Pérot reconfigurables*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2007.
- [Saenz 09] E. Saenz, I. Ederra, R. Gonzalo, S. Pivnenko, O. Breinbjerg & P. de Maagt. *Coupling Reduction Between Dipole Antenna Elements by Using a Planar Meta-Surface*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 2, pages 383–394, 2009.

- [Sarabandi 06] K. Sarabandi, A.M. Buerkle & H. Mosallaei. *Compact Wideband UHF Patch Antenna on a Reactive Impedance Substrate*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 5, no. 1, pages 503–506, 2006.
- [Seman 11] F.C. Seman & R. Cahill. *Performance enhancement of Salisbury screen absorber using resistively loaded spiral FSS*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 53, no. 7, pages 1538–1541, 2011.
- [Serhal 09] D. Serhal. *Radiocommunications avec les véhicules terrestres par antennes sectorielles grand gain. Application aux liaisons haut débit avec les trains*. PhD thesis, Université de Limoges, 2009.
- [Sievenpiper 99] D. Sievenpiper, Lijun Z., R.F.J Broas, N.G. Alexopolous & E. Yablouovitch. *High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 11, pages 2059–2074, 1999.
- [Sun 12] L. Sun & C. Zhang. *Design of broadband microwave absorber utilizing FSS screen constructed with coupling configurations*. Applied Physics A, vol. 109, no. 4, pages 873–875, 2012.
- [Temelkuran 00] B. Temelkuran, M. Bayindir, E. Ozbay, R. Biswas, M.M. Sigalas, G. Tuttle & K.M. Ho. *Photonic crystal-based resonant antenna with a very high directivity*. Journal of Applied Physics, vol. 87, no. 1, pages 603–605, 2000.
- [Trentini 56] G.V. Trentini. *Partially reflecting sheet arrays*. Antennas and Propagation, IRE Transactions on, vol. 4, no. 4, pages 666–671, 1956.
- [Vardaxoglou 96] J.C. Vardaxoglou. *Optical switching of frequency selective surface bandpass response*. Electronics Letters, vol. 32, no. 25, pages 2345–2346, 1996.
- [Vu 09] T.H. Vu. *Antenne à bande interdite électromagnétique (BIE) directive : contribution à l'élargissement de la bande passante et à l'évaluation de l'impédance*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2009.
- [Yahiaoui 09] R. Yahiaoui, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Enhanced directivity of ultra-thin metamaterial-based cavity antenna fed by multisource*. Electronics Letters, vol. 45, no. 16, pages 814–816, 2009.
- [Yang 98] F.R. Yang, Y. Qian & T. Itoh. *A novel compact microstrip bandpass filter with intrinsic spurious suppression*. In Asia Pacific Microwave Conference (APMC98), 1998.
- [Yang 03] F. Yang & Y. Rahmat-Samii. *Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures : a low mutual coupling design*

for array applications. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 51, no. 10, pages 2936–2946, 2003.

- [Zhou 05] L. Zhou, H. Li, Y. Qin, Z. Wei & C.T. Chan. *Directive emissions from subwavelength metamaterial-based cavities*. Applied Physics Letters, vol. 86, no. 10, page 101101, 2005.

Chapitre 2

Développement de métamatériaux

2.1	Introduction	65
2.1.1	État de l'art et contexte	66
2.1.2	Objectifs et contributions	67
2.2	Étude de fils coupés	68
2.2.1	Incidence normale	68
2.2.2	Incidence oblique	74
2.3	Étude de la structure en forme de Z	76
2.3.1	Étude en réflexion et transmission	77
2.3.2	Mise en évidence de modes piégés	81
2.4	Conclusion et perspectives	87
	Bibliographie	89

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une partie des travaux effectués dans le cadre du thème 2. Il porte sur le développement de métamatériaux, briques de base importantes dans les réalisations à base de la transformation optique et aussi des lentilles à gradient d'indice. Nous présenterons dans un premier temps un état de l'art sur les structures à métamatériaux. Bien évidemment, comme de nombreuses études et structures sont apparues dans la littérature, l'état de l'art ne sera pas exhaustif. Nous nous efforcerons à bien décrire nos principales contributions dans ce domaine qui a marqué un vif intérêt partout dans le monde. Les travaux présentés dans ce chapitre se déclinent en trois parties. La première concerne l'étude des fils coupés, avec lesquels nous avons démontré simultanément une permittivité et une perméabilité négatives, et donc un indice négatif. La deuxième partie concerne les structures en forme Z, qui sont présentées comme une alternative intéressante aux autres résonateurs à permittivité négative présentés dans la littérature.

Cette structure est aussi utilisée pour produire de la réflexion et de la transmission électromagnétiquement induite via l'excitation de mode piégé.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux cités ci-dessous :

Thèse en cours	[T-2]
Masters	[MP-1]
Chapitre	O-4
Revue internationale	RI-4, RI-5, RI-17, RI-19, RI-21, RI-23, RI-30, RI-31, RI-38, RI-40, RI-41, RI-43
Communications internationales	CI-8, CI-11, CI-13, CI-14, CI-24, CI-25, CI-31, CI-43, CI-46, CI-52, CI-55, CI-57, CI-59, CI-62, CI-65, CI-66, CI-67
Communications nationales	CN-4, CN-7, CN-12, JS-1, JS-14, JS-16
Collaborations	LEME, IMS, LOMA

2.1.1 État de l'art et contexte

Les métamatériaux ont attiré un intérêt considérable [Shelby 01, Yen 04, Smith 04, Linden 04] en raison de leurs propriétés électromagnétiques hors du commun [Veselago 68] et de leurs applications potentielles comme les capes d'invisibilité [Leonhardt 06, Pendry 06, Schurig 06a]¹, la lentille parfaite [Pendry 00] et les lentilles à gradient d'indice (GRIN) [Liu 09, Neu 10]. Par exemple, les lentilles parfaites nécessitent l'utilisation de métamatériaux main-gauche (MMG ou LHM pour Left-Handed Metamaterial en anglais) ayant un indice de réfraction n négatif [Smith 00], qui peut être produit par une permittivité ϵ et une perméabilité μ simultanément négatives. Les capes d'invisibilité quant à elles nécessitent un indice de réfraction qui varie de 0 à 1. Traditionnellement, ces propriétés sont obtenues par l'utilisation d'une combinaison de résonateurs SRR « Split Ring Resonator » [Pendry 99] et des tiges métalliques [Pendry 96, Pendry 98], avec des périodicités beaucoup plus petites que la longueur d'onde de travail, de sorte que le milieu puisse être considéré comme homogène. Les tiges métalliques présentant une réponse suivant le modèle de Drude, une alternative a été proposée. Le résonateur électrique LC (ELC) suit le modèle de Lorentz et présente une permittivité négative autour de sa résonance [Schurig 06b, Liu 07b]. De la même façon, d'autres résonateurs magnétiques ont été proposés. Ces derniers temps, les paires de fils de longueur finie (paires de fils coupés) ont été proposées non seulement pour remplacer les SRR de Pendry afin de produire une perméabilité négative sous une incidence normale (le SRR fonctionne sous incidence parallèle, c'est à dire que le vecteur d'onde \vec{k} est parallèle au plan de la structure), mais

1. De nombreuses applications issues de la technique dite « Transformation optique » ont été proposées dans la littérature. La première application présentée a été la cape d'invisibilité, mais bien d'autres aussi intéressantes ont émergé par la suite. Le chapitre 3 est entièrement consacré à cette thématique. De ce fait un état de l'art plus détaillé sur les applications de la transformation optique sera fait dans le chapitre 3.

aussi conduire à un indice de réfraction négatif dans le régime optique [Shalaev 05]. Cependant dans un récent article de synthèse, Shalaev a déclaré qu'il était très difficile d'atteindre un n négatif avec exclusivement des paires de fils coupés et que la valeur de l'indice négatif observé dans la Réf. [Shalaev 05] a été obtenue en partie en raison de l'importante contribution de la partie imaginaire de la perméabilité [Shalaev 07]. Néanmoins, l'indice négatif des paires de fils coupés et des paires de pastilles n'a jamais été vérifié ailleurs [Dolling 05]. Par contre, des fils continus ont été combinés avec les paires de fils coupés pour produire simultanément une ϵ et une μ négatives pour conduire à un indice négatif dans le domaine des micro-ondes [Zhou 06b]. Les mêmes auteurs ont également proposé théoriquement un métamatériau à n négatif utilisant seulement les fils coupés en augmentant la capacité équivalente entre deux paires de fils consécutifs afin d'ajuster la fréquence de résonance électrique [Zhou 06a]. Or, cette augmentation de capacité ne peut être obtenue qu'en réduisant fortement l'espacement entre deux fils consécutifs, ce qui est assez difficile à réaliser surtout à très hautes fréquences. La structure dite « fishnet », qui peut être vue comme une association de fils coupés et continus, est composée d'une grille métallique imprimée d'une part et d'autre sur un substrat diélectrique. Cette structure « fishnet » a permis de démontrer un n négatif en optique [Dolling 07] et en micro-ondes [Kafesaki 07].

Les résultats cités ci-dessus concernent principalement le domaine des micro-ondes. Dans le régime de l'optique, les domaines du visible et de l'infrarouge (IR), le souci principal est le problème de conception et de caractérisation des métamatériaux aux dimensions nanométriques. À cette échelle, le contrôle et l'ingénierie des propriétés électromagnétiques des métamatériaux sont étroitement liées à la facilité de la fabrication. Cette facilité est plus importante avec la simplicité des formes géométriques de la cellule unitaire du métamatériau. C'est la raison principale qui nous ont poussé à étudier des méta-atomes comme les fils coupés et les structures en forme de « Z ». Nous montrerons que nous pouvons changer la forme classique du SRR de Pendry par des fils coupés, en gardant les mêmes propriétés électromagnétiques.

2.1.2 Objectifs et contributions

Dans ce chapitre, je présente nos travaux dans le domaine du développement de structures à métamatériaux car elles sont les briques de base qui occupent une part essentielle dans nos activités sur l'application des métamatériaux pour des dispositifs électromagnétiques. Ces travaux font suite à la thèse d'A. Djermoun dirigée par A. de Lustrac et soutenue en 2005 [Djermoun 05] et aussi de ma thèse soutenue en 2005 à l'université de Nantes [Burokur 05]. Quand j'ai rejoint l'IEF en septembre 2006, j'ai donc encadré plusieurs travaux sur le développement des structures à métamatériaux où nous avons proposé des résultats intéressants. La thèse d'A. Dhouibi, que j'encadre actuellement et qui soutiendra en novembre 2013, porte notamment dans un premier temps sur le développement des métamatériaux. Les objectifs de notre travail sont multiples :

- proposer des structures simples à réaliser pour une fabrication possible dans les domaines du visible et de l'infrarouge

- étudier les métamatériaux sous incidence oblique, ce qui est rarement le cas dans la littérature
- proposer l’excitation de modes piégés via l’utilisation d’un résonateur unique, contrairement à l’utilisation de deux résonateurs comme présenté dans la littérature

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudierons numériquement et expérimentalement les propriétés électromagnétiques des paires de fils coupés où la symétrie entre les fils sur les faces opposées est volontairement brisée le long de la direction du champ électrique [Kanté 09, Sellier 09, Burokur 09b, Burokur 09a, de Lustrac 12]. Nous montrerons que dans ce cas la résonance électrique des fils coupés peut survenir à des fréquences plus basses que la résonance magnétique, qui est en opposition avec la configuration symétrique. Cette basse fréquence de résonance électrique permet de réaliser une plage commune de fréquence où la perméabilité et la permittivité sont simultanément négatives. Cette affirmation est vérifiée numériquement et expérimentalement dans le domaine des micro-ondes et des indications sur la conception de structures à indice de réfraction négatif composées uniquement de paires de fils coupés sont données. Ensuite, nous étudierons numériquement et expérimentalement les spectres de réflexion et de transmission pour une onde plane en incidence oblique sur la structure asymétrique.

Puis, nous présenterons la structure en forme de « Z » comme résonateur électrique avec un grand rapport de milieu effectif. De part son asymétrie structurelle, le résonateur en « Z » permet à lui seul de produire une résonance de mode sombre (mode piégé). Ainsi, nous montrerons que suivant l’orientation du champ incident, l’excitation de ce mode piégé peut conduire soit à une résonance étroite dans la réflexion ou dans la transmission.

2.2 Étude de fils coupés

2.2.1 Incidence normale

Dans cette section, nous proposons une méthode très simple qui est basée sur la manipulation des résonances de la structure de paires de fils coupés afin d’avoir un indice négatif. Cette manipulation se fait par le biais de la brisure de symétrie de la structure dans la direction parallèle au champ E. Dans ce cas, nous montrons que la résonance électrique de la structure où $\epsilon < 0$ se produit à une fréquence inférieure à celle de la résonance magnétique où $\mu < 0$, contrairement au cas de la structure complètement symétrique. Comme ϵ est négatif sur une large bande de fréquences, on peut obtenir simultanément $\epsilon < 0$ et $\mu < 0$. Ces affirmations sont validées par des simulations numériques et par des expériences sur des prototypes fabriqués. Ces résultats ont été la première démonstration expérimentale de l’indice négatif obtenu avec des paires de fils coupés exclusivement. Une mesure sur la propagation électromagnétique à travers un prisme conçu à partir de plusieurs couches empilées de ce métamatériau est venu par la suite confirmer la réfraction négative.

La Fig. 2.2.1 donne un aperçu sur les trois structures en configuration bi-couche qui produisent un n négatif. Sur cette figure, la structure que nous proposons possède moins de partie métalliques que les deux autres. Elle semble être la mieux appropriée pour une

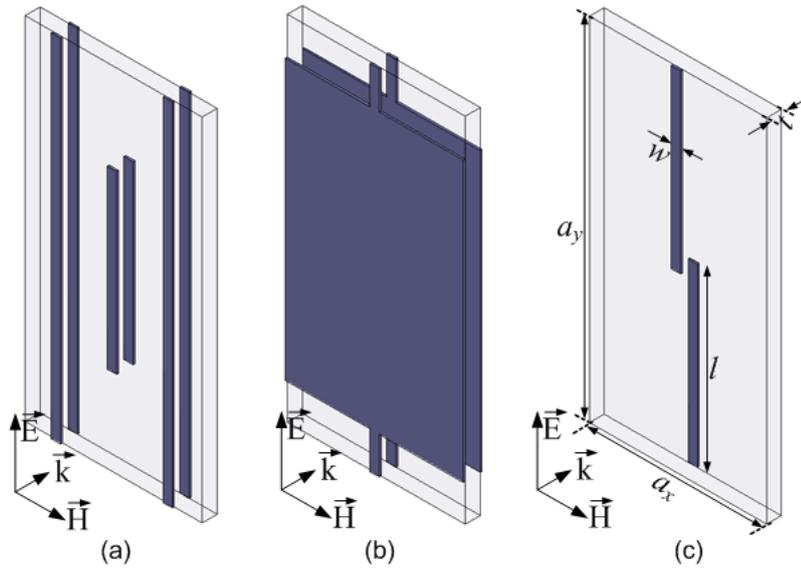


FIGURE 2.2.1: Topologie des structures bi-couches permettant d'avoir un n négatif. (a) Combinaison de fils coupés et continus. (b) Structure « fishnet ». (c) Notre structure proposée composée de fils coupés uniquement.

transposition dans le domaine de l'optique car elle introduira moins de pertes dues au métal.

La structure que nous avons proposée sur la Fig. 2.2.1(c) est issue d'une paire de fils coupés comme celle présentée sur la Fig. 2.2.2. Pour comprendre le fonctionnement de la structure bi-couche de fils coupés, considérons un fil coupé simplement, qui est le dipôle électrique de base. Cette structure mono-couche produit une résonance dans la transmission. Lorsqu'une deuxième structure supportant une résonance à la même fréquence (recouvrement spectral) recouvre spatialement la première structure pour constituer une structure bi-couche symétrique, les deux motifs se couplent et lèvent la dégénérescence du mode dipolaire du fil coupé. Il se forme alors deux modes plasmoniques de symétrie opposée. Le mode antisymétrique (à $f_m = 8,9$ GHz sur la courbe de transmission de la Fig. 2.2.2(b)) avec sa boucle virtuelle de courant donne un moment magnétique (Fig. 2.2.2(c)) alors que le mode symétrique à $f_e = 11,5$ GHz avec les courants oscillants en phase correspond à un moment électrique (Fig. 2.2.2(c)).

Faire coïncider ces deux résonances permet donc d'avoir un indice de réfraction négatif. Pour cela, nous avons appliqué un décalage dy suivant l'axe des dipôles. Pour des décalages suffisamment grands, nous pouvons changer la nature des interactions de Coulomb [Christ 07] présentes dans la structure et transformer une force initialement attractive en force répulsive et vice versa. Cette inversion des interactions de Coulomb se traduit par l'inversion du schéma d'hybridation avec le mode antisymétrique se produisant à une fréquence plus élevée que le mode symétrique [Kanté 09].

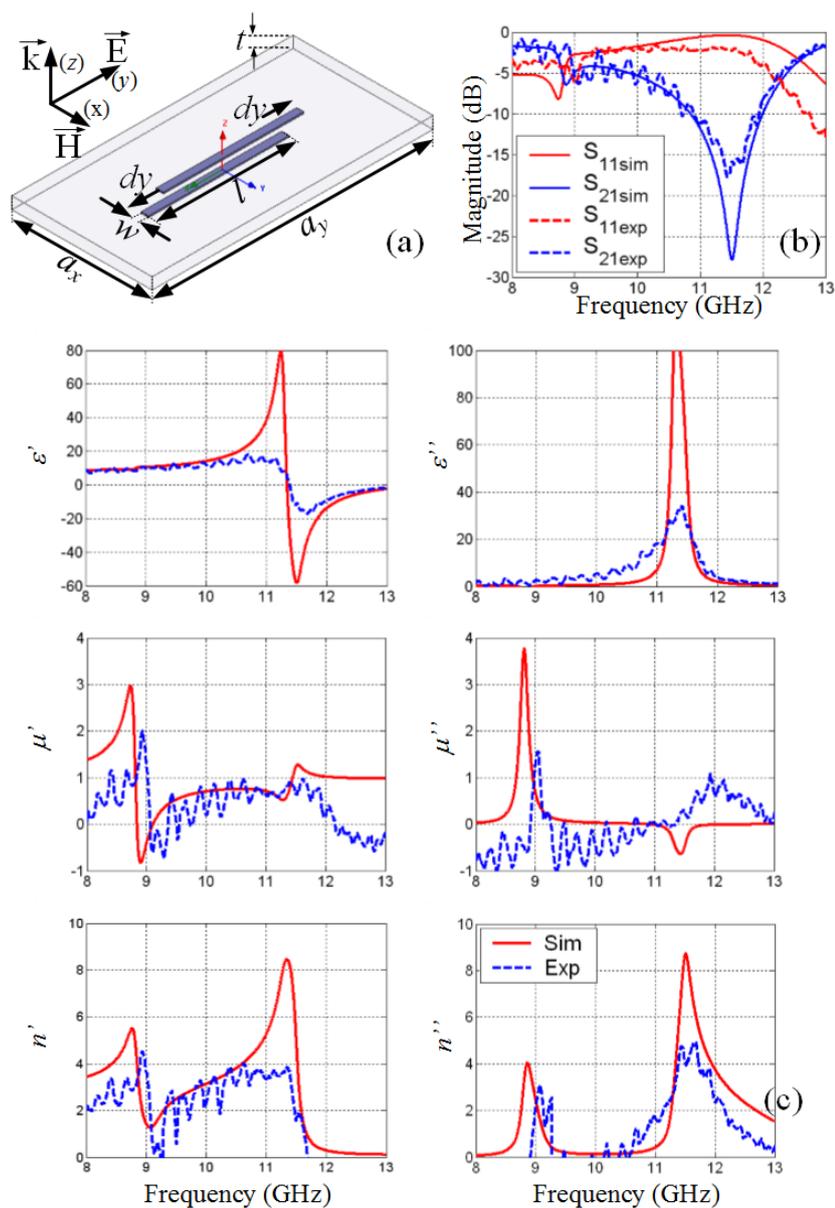


FIGURE 2.2.2: Structure et réponses d'une paire de fils coupés symétriques ($d_y = 0$) et ses caractéristiques sous une incidence normale. La longueur et la largeur des fils sont respectivement $l = 9,5$ mm et $w = 0,3$ mm. Les périodicités sont $a_x = 9,5$ mm et $a_y = 19$ mm.

En d'autres termes, pour avoir simultanément $\epsilon < 0$ et $\mu < 0$, il faut donc augmenter f_m pour qu'elle se retrouve dans la bande $\epsilon < 0$. La structure agissant comme un résonateur LC, f_m est calculée à partir de la capacité équivalente magnétique C_m créée par la section surfacique superposée des deux fils, comme nous le montre la cartographie du champ

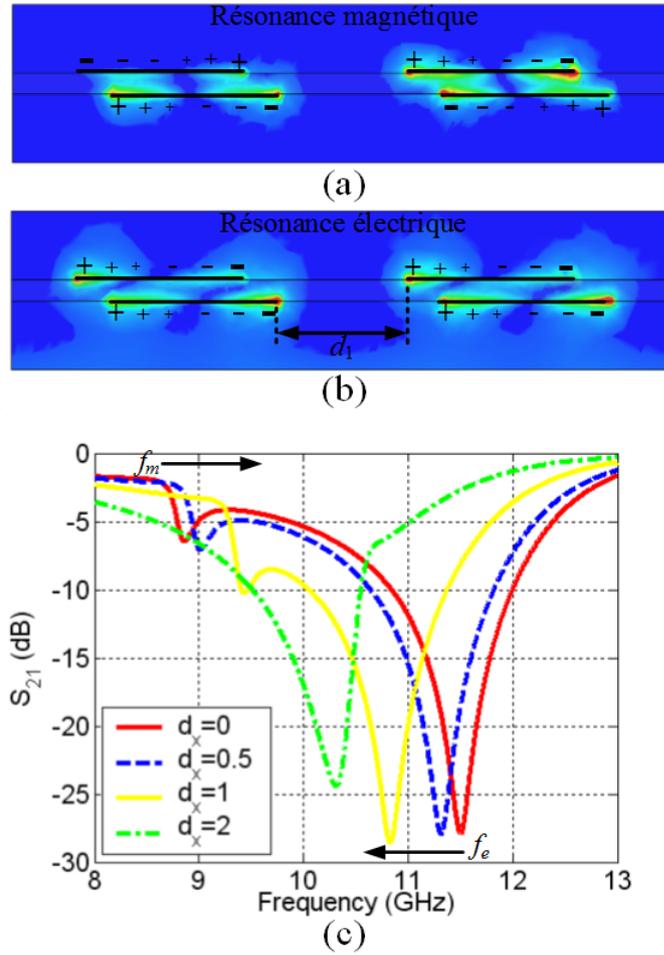


FIGURE 2.2.3: Distribution du champ E : (a) Résonance magnétique, (b) Résonance électrique. (c) Réponses en transmission pour différents décalages dy .

E sur la Fig. 2.2.3(a) [Burokur 09b]. En appliquant des valeurs non nulles à dy , nous réduisons ainsi C_m et augmentons f_m . Cet effet est constaté pour $dy = 0,5$ et 1 mm. Nous pouvons aussi observer que lorsque nous augmentons dy , f_e diminue due à l'augmentation de la capacité équivalente électrique C_e créée entre les fils de deux cellules voisines (Fig. 2.2.3(b)). Cette augmentation est due à la diminution de la distance entre les fils des deux cellules voisines. Pour $dy = 2$ mm, la résonance magnétique se produit à une fréquence supérieure à celle de la résonance électrique, même si elles sont très proches. On peut alors s'attendre que pour $dy \geq 2$ mm, ϵ et μ seront simultanément négatives (Fig. 2.2.3(c)).

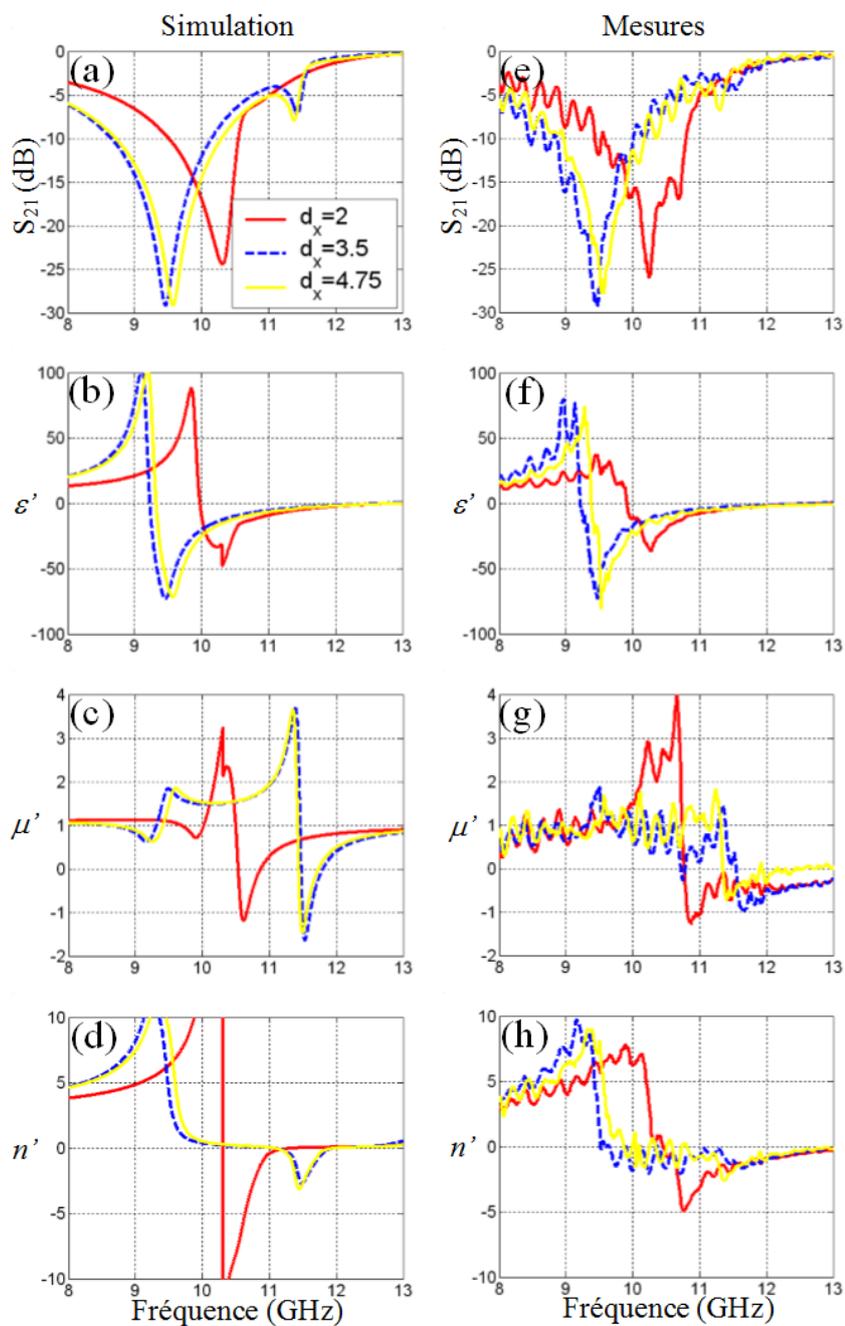


FIGURE 2.2.4: Caractéristiques sous une incidence normale d'une paire de fils coupés asymétriques ($dy \neq 0$).

Pour la caractérisation des structures à métamatériaux, nous appliquons la procédure de tests suivante. Une chambre anéchoïde équipée d'un analyseur de réseau Agilent

8722ES et de deux antennes cornet large bande (2-18 GHz) est utilisée. Dans les mesures de transmission, les ondes planes sont incidentes perpendiculairement à la surface du prototype et l'étalonnage est réalisé en espace libre (l'échantillon à métamatériau est enlevé) entre les deux antennes cornets. Les mesures de réflexion sont faites en plaçant les deux antennes (émettrice et réceptrice) sur le même côté du prototype et inclinées avec un angle d'environ 5° par rapport à la normale de la surface du prototype. L'étalonnage en réflexion se fait en utilisant une feuille de cuivre comme réflecteur parfait.

Les mesures effectuées sur les prototypes et la procédure d'extraction de paramètres effectifs décrite dans [Nicolson 70] appliquée, a conduit aux résultats présentés sur la Fig. 2.2.4. Les Figs. 2.2.4(d) et 2.2.4(h) montrent clairement une bande de fréquences pour chaque dy où la partie réelle de l'indice n est négative. Ceci est dû au fait que la bande de fréquences $\text{Re}(\epsilon) < 0$ se trouve dans la bande $\text{Re}(\mu) < 0$. Ceci constitue donc un vrai indice négatif et non pas un qui est obtenu par la contribution de parties imaginaires des paramètres. La brisure de symétrie constitue donc un moyen très facile à manipuler les résonances afin d'avoir un indice négatif.

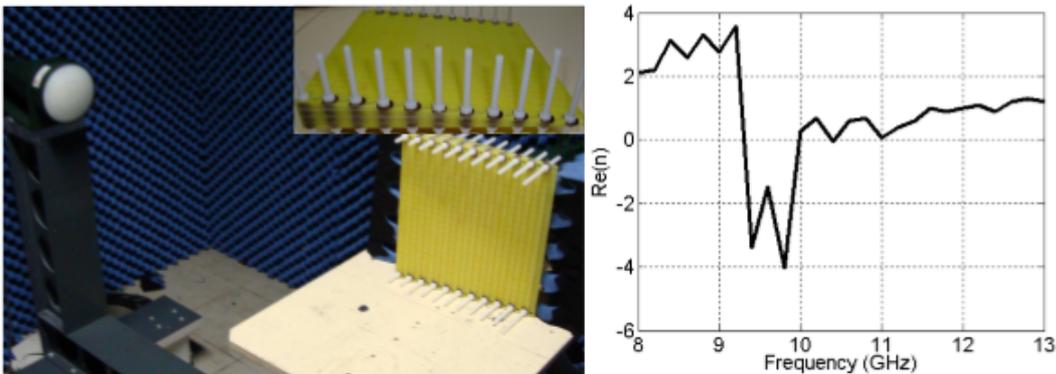


FIGURE 2.2.5: Mesures sur un prisme composé d'un empilement de couches de fils coupés asymétriques montrant un indice de réfraction négatif.

Afin de vérifier les paramètres effectifs extraits à partir de la méthode d'inversion de la section précédente, une mesure d'indice a été entreprise en utilisant un prisme conçu en empilant plusieurs couches du métamatériau [Sellier 09]. En effet, la propagation d'une onde électromagnétique à travers un prisme montre si la réfraction est positive ou négative, et permet aussi de calculer la valeur de l'indice en appliquant la loi de Snell-Descartes. Le prisme est composé de 10 couches du métamatériau espacées de 1 mm. Dans notre cas, le prisme montre une réfraction négative et aussi des valeurs négatives de l'indice autour de 9,7 GHz comme on peut l'observer sur la Fig. 2.2.5. On peut noter que la bande de fréquences où $n < 0$ est plus basse que celle obtenue par la méthode d'inversion effectuée sur une couche unique du métamatériau de la section précédente. Ceci est dû à la propagation de l'onde à travers les multiples couches.

2.2.2 Incidence oblique

Une étude plus poussée sur les fils coupés asymétrique ($dy = 4,75$ mm) a été faite, en particulier sur la dépendance des résonances et des paramètres effectifs sur l'angle d'incidence θ [Burokur 09a]. Trois angles différents, à savoir 15° , 30° et 45° dans les deux plans E et H du réseau carré ont été étudiés. Les résultats dans le plan H sont présentés sur la Fig. 2.2.6. Les courbes de transmission montrent clairement deux pics de résonance, une électrique à 9,5 GHz et une magnétique à 11,5 GHz. Ces deux résonances se révèlent être indépendantes de l'angle d'incidence dans le plan H. Pour extraire les paramètres effectifs sous une incidence oblique, la procédure d'extraction de [Nicolson 70] doit être modifiée et l'anisotropie doit être prise en compte. En effet, les paires de fils coupés représentent un milieu anisotrope biaxial dont l'axe principal est le long de x , y et z . De ce fait, les matrices S (2×2) utilisées en incidence normale ne sont plus suffisantes et la matrice complète (4×4) qui prend en compte le couplage des ondes polarisées s et p doit être utilisées [Yeh 98]. Toutefois, étant donné que le champ électrique dans notre cas est toujours le long de y indépendamment de θ , il n'y a pas de polarisation croisée et c'est pourquoi nous pouvons utiliser uniquement la matrice S 2×2 pour les ondes polarisées s . Dans ce cas l'indice effectif est donné par :

$$\frac{\epsilon_y \mu_x \mu_z}{\mu_z \cos^2 \theta + \mu_x \sin^2 \theta} \quad (2.2.1)$$

Les Figs. 2.2.6(d)-(f) montrent que l'indice n est pratiquement similaire par rapport au cas de l'incidence normale (0°).

Les résultats pour le réseau carré dans le plan E sont présentés sur les Figs. 2.2.7(a)-(c). On peut observer un pic qui est beaucoup plus marqué que la résonance antisymétrique ou symétrique. Ce pic se déplace avec l'angle d'incidence de 12,47 GHz à 15° à 10,5 GHz à 30° et 9,22 GHz à 45° . C'est la manifestation d'un seuil de diffraction, à savoir celle de l'ordre diffracté $(0, -1)$ sur l'ordre spéculaire $(0,0)$ [Petit 80]. À ces fréquences l'ordre diffracté $(0, -1)$ passe d'évanescence à propagatif, apparaissant sous incidence rasante. Les fréquences de seuils de diffraction calculées avec *HFSS* et avec l'Eq. 2.2.2 de la théorie des réseaux en tenant compte du fait qu'il n'y ait aucun composant du vecteur d'onde le long de x dans le plan E :

$$k_{\perp} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r - k_{\parallel}^2} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r - \left(m \frac{2\pi}{a_x}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{c} \sin \theta + n \frac{2\pi}{a_y}\right)^2} \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (2.2.2)$$

En raison des valeurs respectives $a_x = 9,5$ mm et $a_y = 19$ mm, nous voyons que l'ordre $(0, -1)$ est le premier diffracté à devenir propagatif. Les résultats pour les fréquences de seuils de diffraction sont résumés dans le Tab. 2.1.

Par comparaison, dans le plan H même à un angle incident de 45° , l'ordre diffracté $(0, -1)$ est supérieure à 18 GHz. Pour éviter l'apparition d'un seuil de diffraction, un réseau triangulaire comme indiqué dans l'encart de la Fig. 2.2.7(d) est proposé pour remplacer le réseau carré. Dans le réseau triangulaire, chaque cellule le long de x est latéralement

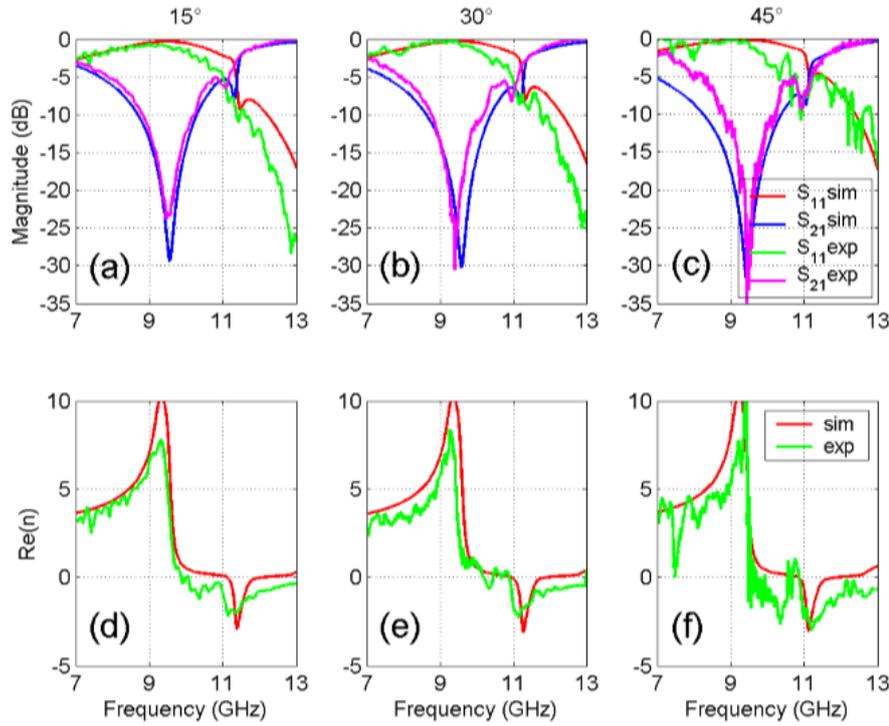


FIGURE 2.2.6: Réponses en incidence oblique dans le plan H sur des paires de fils coupés asymétrique.

déplacée de 4,75 mm le long de y . Dans ce réseau, les fréquences de seuils de diffraction sont données par l'Eq. 2.2.3 :

$$k_{\perp} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r - k_{\parallel}^2} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r - \left((2m - n) \frac{2\pi}{a_x} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{c} \sin \theta + n \frac{2\pi}{a_y} \right)^2} \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (2.2.3)$$

Les courbes de réflexion et de transmission présentées sur les Figs. 2.2.7(d)-(f) confirment l'annulation du seuil de diffraction au-dessus de 13 GHz. En outre, nous pouvons noter un décalage dans la fréquence des résonances symétriques et antisymétriques avec l'angle d'incidence. Ce décalage beaucoup plus fort que pour des résonances dans le plan H, entraîne une annulation de la superposition de fréquence, donc de l'indice négatif, au-dessus de 20°. Comme nous pouvons noter plus particulièrement pour $\theta = 15^\circ$, la résonance magnétique se décale vers des fréquences plus basses pour le réseau triangulaire (10,43 GHz) par rapport au réseau carré (11,02 GHz). Ceci est dû à un couplage capacitif supplémentaire entre les fils déplacés le long de y sur la même face du substrat diélectrique.

En résumé, nous avons présenté une structure basée uniquement sur des fils coupés

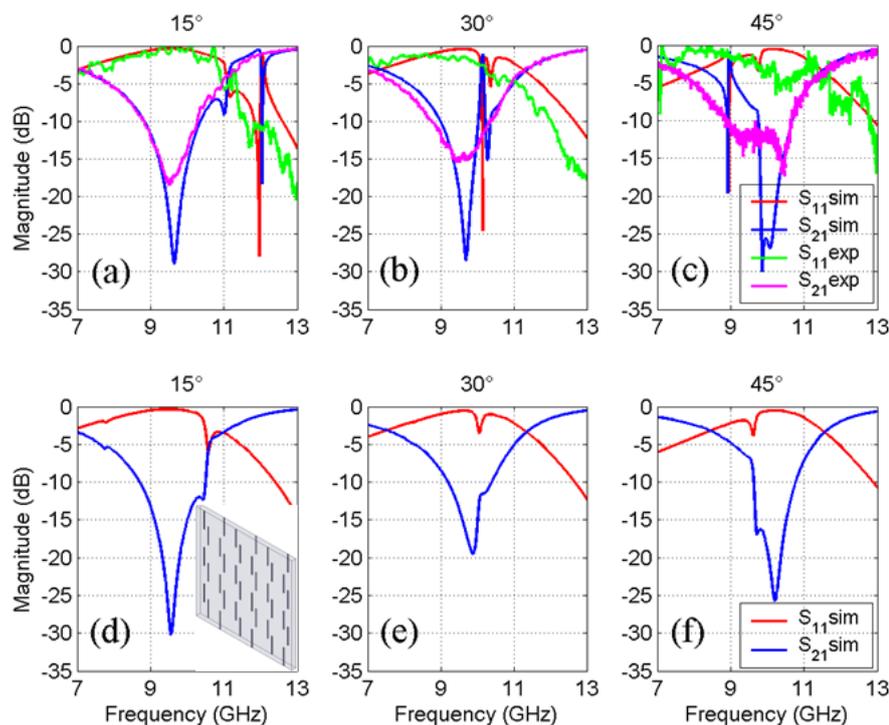


FIGURE 2.2.7: Réponses en incidence oblique dans le plan E sur des paires de fils coupés asymétrique.

pour obtenir un indice de réfraction négatif. Nous avons aussi étudié la dépendance des résonances et de l'indice effectif sur l'angle d'incidence dans les paires de fils coupés asymétriques. Aucun changement n'a été observé pour l'incidence oblique dans le plan H. Cependant pour le plan E, un seuil de diffraction apparaît pour le réseau carré rendant l'introduction des paramètres effectifs dénuée de sens. Un réseau triangulaire a donc été proposé afin d'éviter que le seuil de diffraction en-dessous des résonances électriques et magnétiques. Cependant, ce réseau conduit à un manque de superposition des fréquences de résonance au-dessus de 20° . En conclusion, les paires de fils coupés asymétriques possèdent un indice négatif dans une large gamme angulaire autour de l'incidence normale.

2.3 Étude de la structure en forme de Z

Plusieurs formes de méta-atomes comme les SRR [Pendry 99] ou les résonateurs électriques LC (ELC) [Schurig 06b] ont été utilisés pour la réalisation des matériaux à perméabilité et permittivité négatives respectivement. Afin de pouvoir utiliser ces structures résonantes dans le régime des milieux effectifs, le rapport de milieu effectif, c'est

Angle, θ (°)	HFSS (réseau carré) Mode (0, -1)	Réseau (réseau carré) Mode (0, -1)	HFSS (réseau triangulaire) Mode (0, -1)	Réseau (réseau triangulaire) Mode (0, -1)
0	15,78	15,79	22,31	22,33
15	12,58	12,54	19,15	19,15
30	10,54	10,53	17,31	17,32
45	9,24	9,25	16,35	16,35

TABLE 2.1: Fréquences de seuil de diffraction (GHz).

à dire le rapport λ/a entre la longueur d'onde et la taille des hétérogénéités, doit être supérieur à 4 [Koschny 05]. Différentes approches basées sur l'idée commune d'augmenter la capacitance ou l'inductance totale de la cellule élémentaire ont été introduites dans la littérature pour améliorer l'homogénéité de tels matériaux. Une méthode classique et bien connue consiste à modifier les dimensions géométriques de la structure, c'est-à-dire, rétrécir les gaps ou rallonger les pistes afin d'augmenter la capacité ou l'inductance. D'autres solutions particulières telles l'utilisation des condensateurs interdigitaux [Withayachumnankul 10] ou des substrats de haute permittivité ou perméabilité [Caloz 05] ont été proposées. Toutefois, ces tentatives sont très limitées selon la technologie de fabrication surtout lorsque nous montons en fréquence.

Le but de notre étude est d'examiner numériquement et expérimentalement le comportement électromagnétique en micro-ondes d'un méta-atome ayant la forme d'un « Z ». Nous montrons qu'une telle structure présente une résonance électrique à une fréquence plus basse que celle du résonateur ELC pour des dimensions similaires. Le résonateur « Z » pourrait donc être une alternative intéressante à l'ELC classique et pourrait être utilisé pour la réalisation des matériaux à permittivité négative.

2.3.1 Étude en réflexion et transmission

2.3.1.1 Réponse sous incidence normale

Comme point de départ, nous avons donc considéré le résonateur ELC illustré sur la Fig. 2.3.1(a). Ce méta-atome est constitué d'une boucle inductive reliée à un élément capacitif. Seule la capacité formée par le gap central couple avec le champ électrique (Fig. 2.3.1(b)), inversement au SRR de Pendry où l'élément inductif couple uniquement avec le champ magnétique. Nous proposons par des transformations continues, de réduire l'empreinte classique de l'ELC afin obtenir un résonateur sous la forme d'un Z (Fig. 2.3.1(c)) qui résonne plus bas en fréquence.

Nous appliquons des transformations géométriques simples sur la cellule unité d'un résonateur ELC. Ces transformations visent à améliorer l'homogénéité du matériau et faciliter le processus de sa fabrication. La première transformation consiste à supprimer les lignes latérales orientées le long de l'axe y . La structure résultante est en forme de 'T' avec un gap capacitif central. Cette transformation permet de diminuer l'inductance de l'élément. Par contre, nous augmentons la capacité du résonateur en ayant introduit les

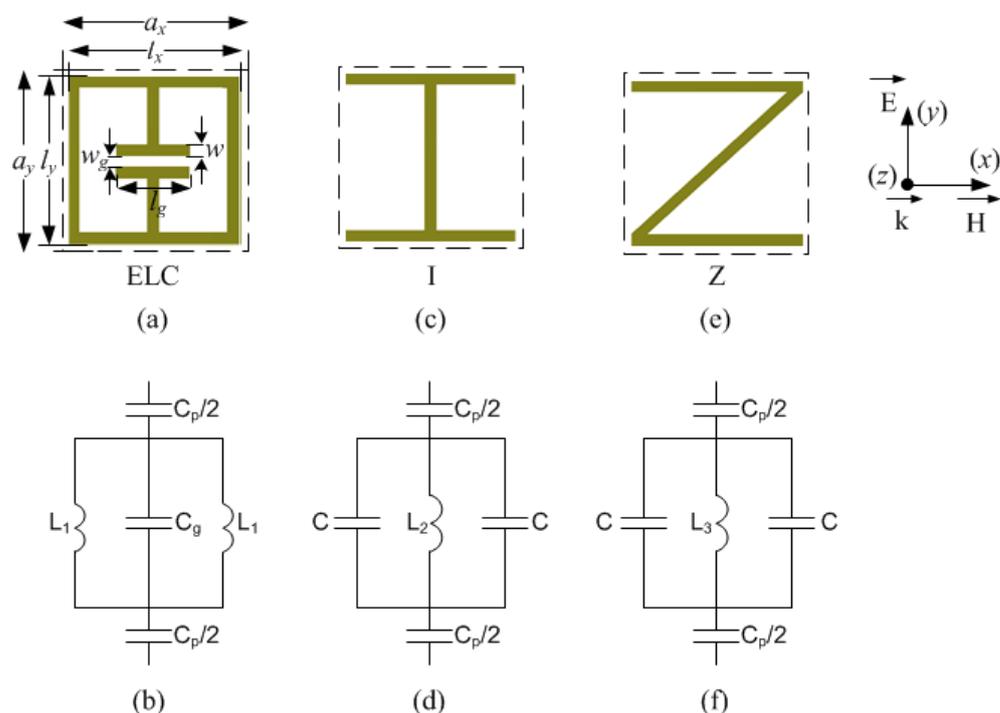


FIGURE 2.3.1: Transformations du résonateur ELC en « Z ».

deux gaps latéraux. Notons que la valeur de la capacité ajoutée reste négligeable devant celle du gap central et donc cette structure résonne plus haut en fréquences que l'ELC. En supprimant le gap central de ce résonateur, nous obtenons la structure en 'I', illustré sur la Fig. 2.3.1(c). La typologie LC du circuit équivalent à ce résonateur montrée sur la Fig. 2.3.1(d), change par rapport à celle de l'ELC. La capacité C_p , qui conduit la résonance LC est formée dans ce cas par l'espacement entre deux cellules consécutives et non par le gap central. Une deuxième transformation géométrique, appliquée cette fois-ci directement sur le résonateur en « I », consiste à redresser sa structure sous la forme d'un « Z » comme présentée dans la Fig. 2.3.1(e) [Dhouibi 12c]. En appliquant cette transformation, nous augmentons la longueur physique de l'élément inductif du résonateur sans modifier sa périodicité. Le modèle équivalent en terme de circuit est donné dans la Fig. 2.3.1(f). On s'attend à ce que cette structure résonne plus bas en fréquence que le résonateur en « I ». Une étude paramétrique a permis de montrer que le paramètre est très critique dans ce genre de structure [Dhouibi 12b, Dhouibi 12a].

Les réponses en réflexion et transmission pour les structures ci-dessus sont présentées sur la Fig. 2.3.2. La fréquence de résonance du résonateur Z est inférieure à celle de l'ELC. En terme de rapport λ/a obtenu entre la longueur d'onde à la résonance et la périodicité de la cellule unité, une amélioration de 1,9 a été obtenue par rapport à l'ELC.

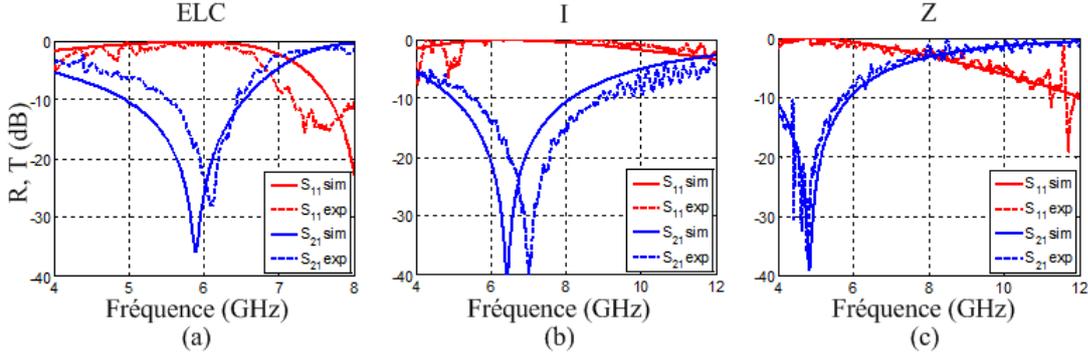


FIGURE 2.3.2: Réponses des résonateurs ELC, I et Z.

2.3.1.2 Comportement en polarisation croisée

La symétrie du résonateur ELC implique la présence à la fois d'un couplage à un champ électrique et d'un couplage à un champ magnétique. Cependant, la symétrie des deux boucles inductives équivalentes mais opposées permet d'annuler le couplage magnétique de la structure, ce qui justifie la réponse purement électrique à la résonance fondamentale d'un tel résonateur. Dans le cas du résonateur en Z, une seule symétrie est apparente par rotation de 180° selon l'axe z . Dans ce cas, la polarisation des modes propres de la structure n'est pas aussi simple que celle de l'onde incidente présentée sur la Fig. 2.3.1. L'étude des polarisations croisées et du couplage magnéto-électrique est donc nécessaire. Dans un premier temps, nous commençons par l'étude des polarisations croisées pour le résonateur en Z. Deux modes propres correspondants aux polarisations selon x et selon y sont considérés pour l'étude numérique. Les coefficients de transmission linéaire T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} et T_{yy} sont utilisés pour calculer les coefficients de transmission circulaire T_{++} , T_{+-} , T_{-+} et T_{--} selon l'Eq. 2.3.1 [Zhou 09] :

$$\begin{bmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (T_{xx} + T_{yy}) + i(T_{xy} - T_{yx}) & (T_{xx} - T_{yy}) - i(T_{xy} + T_{yx}) \\ (T_{xx} - T_{yy}) + i(T_{xy} + T_{yx}) & (T_{xx} + T_{yy}) - i(T_{xy} - T_{yx}) \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

Les coefficients de transmission T_{++} et T_{--} du résonateur en Z sont représentés sur la Fig. 2.3.3(a). Contrairement à un matériau chiral [Zhou 09], l'onde électromagnétique circulaire droite est équivalente à la circulaire gauche. Le même comportement est observé avec le résonateur ELC sur la Fig. 2.3.3(b). L'angle de rotation et l'ellipticité de la polarisation sont donnés respectivement par les Eq. 2.3.2 et 2.3.3 :

$$\theta = \frac{[\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})]}{2} \quad (2.3.2)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{|T_{++}| - |T_{--}|}{|T_{++}| + |T_{--}|} \right) \quad (2.3.3)$$

Ces deux paramètres sont présentés pour le résonateur en Z et l'ELC sur les Fig.

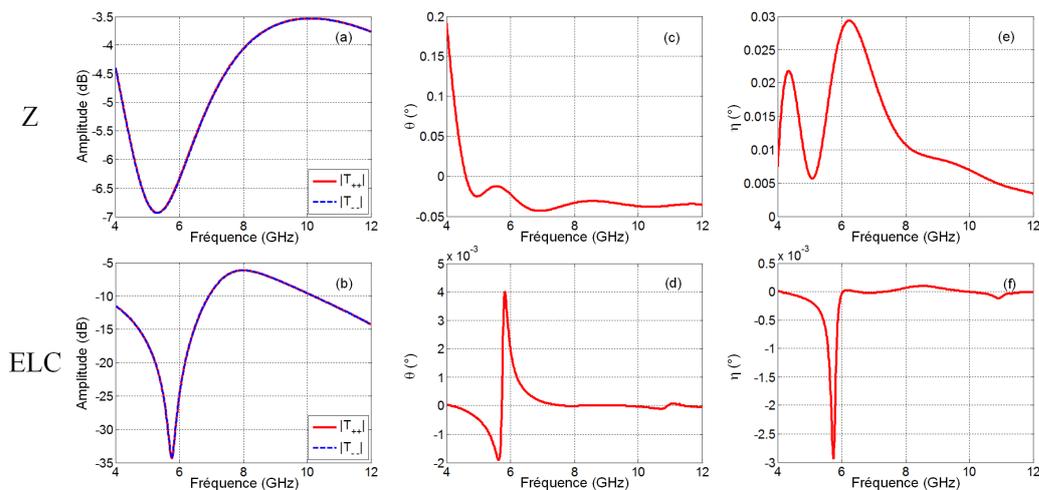


FIGURE 2.3.3: Coefficients de transmission circulaire, angle de rotation θ et d'ellipticité η des résonateurs ELC et Z.

2.3.3(c) et 2.3.3(e), et 2.3.3(d) et 2.3.3(f) respectivement. L'angle de rotation et l'ellipticité de la polarisation sont très proches de zéro pour les deux résonateurs, ce qui implique la non chiralité de ces deux structures.

2.3.1.3 Mesures expérimentales de la bianisotropie

Pour vérifier expérimentalement l'effet de la bianisotropie dans le résonateur en Z, des mesures de transmissions en polarisation croisée ont été faites sur les échantillons selon la procédure décrite dans [Smith 06]. Les mesures sur les différents échantillons sont présentées sur la Fig. 2.3.4(a)-(c) pour une incidence normale (0°) et sur la Fig. 2.3.4(d)-(f) pour une incidence oblique de 45° dans le plan E. Pour la normalisation des signaux, des mesures en polarisation directe et en polarisation croisée sont effectuées en l'absence des échantillons. Pour le résonateur en Z, la polarisation croisée est considéré comme étant négligeable pour les fréquences en-dessous de 6 GHz vu que le niveau de transmission est équivalent à celui obtenu dans le vide (mesure sans échantillon). Cependant, le niveau de la polarisation croisée augmente considérablement au-dessus de 6 GHz, indiquant la présence de couplage magnéto-électrique. La fréquence de résonance du résonateur en Z étant aux alentours de 4,9 GHz (Figure 2(c)), nous déduisons ainsi que cette structure permet de réaliser une réponse purement électrique à sa résonance comme celle relevée pour le résonateur ELC malgré le manque de symétrie. D'autres mesures ont été effectuées sur un résonateur en I résonant à 7 GHz (hautement symétrique), et les résultats sont comparables à celles obtenues pour l'ELC.

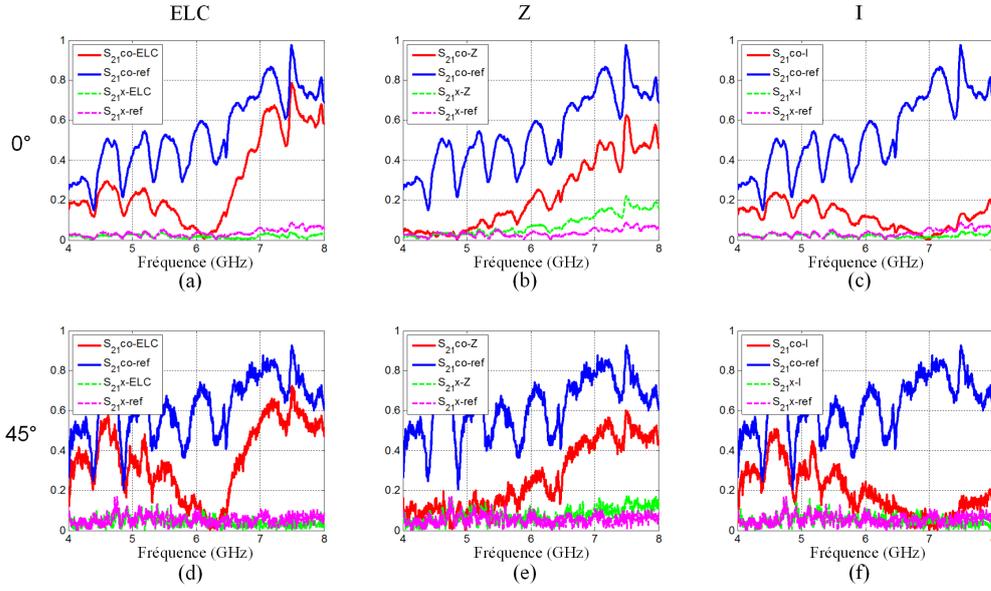


FIGURE 2.3.4: Mesures de transmission en polarisation croisée des résonateurs ELC, I et Z.

2.3.1.4 Paramètres effectifs

En utilisant les coefficients de réflexion et de transmission du résonateur en Z excité par une onde linéaire polarisée selon l'axe y , les paramètres effectifs peuvent être extraits. Les parties réelles et imaginaires de la permittivité des différentes structures sont reportées sur la Fig. 2.3.5. En accord avec ce que nous attendions, les résonateurs montrent une réponse purement électrique. Pour tous les résonateurs, une forte réponse électrique, avec les parties réelles de la permittivité allant des valeurs positives vers les valeurs négatives, est obtenue. Notons que pour le résonateur en Z, la procédure de l'extraction appliquée est valable uniquement aux alentours de la résonance vu qu'il existe un couplage magnéto-électrique au-dessus de la résonance.

Les résultats présentés montrent que le résonateur en Z pourrait éventuellement être une bonne alternative au résonateur ELC d'une part pour son meilleur rapport de milieu effectif (λ/a) et d'autre part pour sa géométrie très simple sans gap capacitif.

2.3.2 Mise en évidence de modes piégés

Dans cette section, je discute à propos de l'excitation d'un mode sombre (ou piégé) dans ce méta-atome en forme de Z [Dhouibi 13]. Je montrerai que le résonateur Z montre une résonance de mode piégé. Selon l'orientation de l'onde électromagnétique incident sur le Z, l'excitation du mode sombre peut soit conduire à une résonance étroite dans la réflexion ou à une résonance très asymétrique de type Fano dans la transmission [Benisty 09, Miroshnichenko 10, Luk'yanchuk 10], analogue à la transparence électro-

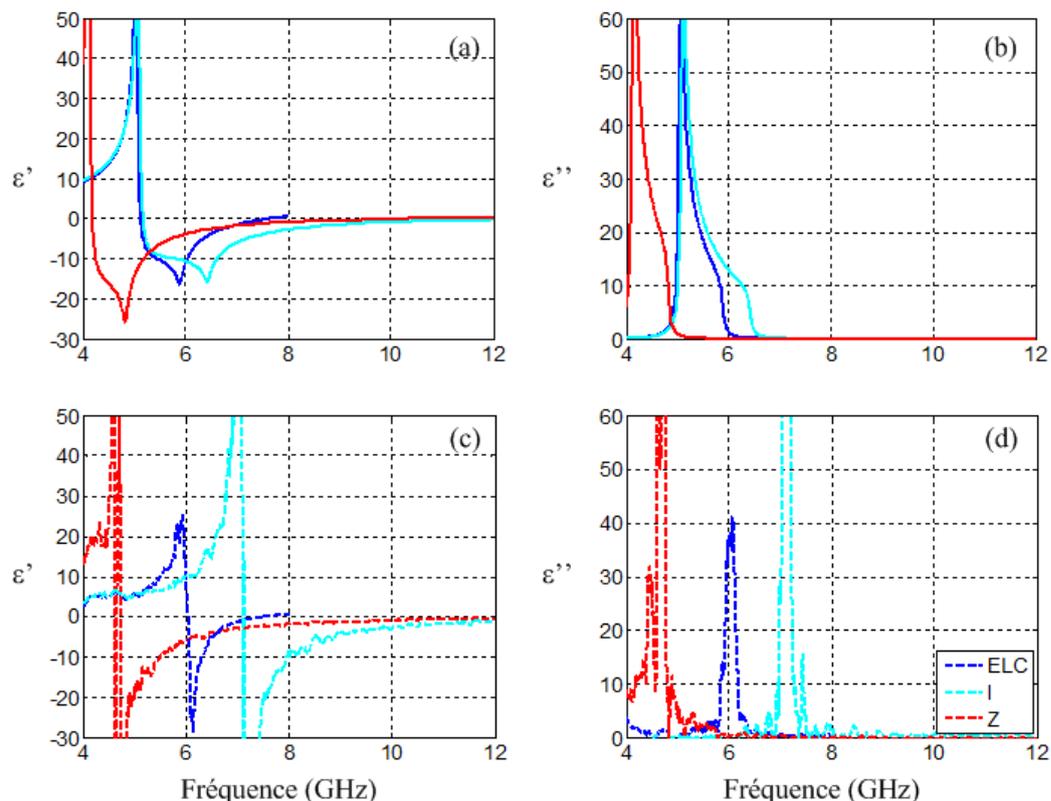


FIGURE 2.3.5: Paramètres effectifs des résonateurs ELC, I et Z.

magnétiquement induite.

En effet, la résonance asymétrique de Fano a récemment été observée pour la première fois dans un réseau d'anneaux fendus asymétriques, composés de deux arcs filaires de longueur différente [Fedotov 07]. L'idée a été poussée plus loin en utilisant des métasurfaces pour mimer les réponses caractéristiques de la transparence électromagnétiquement induite (EIT) [Papastimakis 08, Papastimakis 09]. L'EIT est un phénomène optique qui transforme un milieu initialement opaque en un milieu transparent au moyen de l'interférence quantique destructive entre deux canaux d'excitation et est lié à l'existence d'un mode sombre découplé du faisceau incident [Fleischhauer 05]. L'établissement d'un tel phénomène nécessite l'utilisation d'un laser de pompage. Cependant, les modes sombres où la répartition de courant est similaire en amplitude mais avec des directions opposées, ont été observés dans deux structures à métamatériaux impliquant soit deux géométries différentes qui sont asymétriques [Papastimakis 09] ou dans des structures avec une brisure de symétrie [Papastimakis 08, Dong 10, Singh 11b, Liu 11, Aydin 10, Singh 11a, Liu 10]. Et plus récemment, ces modes de facteur de qualité Q élevés ont été aussi observés dans des structures symétriques bi-couches [Seo 12]. De plus, un simple résonateur symétrique en forme de U a été utilisé sous incidence oblique pour démontrer

une transmission avec un comportement de type EIT [Shao 13]. À l'inverse de toutes ces études précédentes, notre travail porte sur l'excitation d'un mode piégé d'une surface composée d'un réseau planaire de seulement un type de résonateurs en forme de Z possédant une géométrie à inversion de symétrie. Cette étude a été très motivée par les perspectives de l'effet d'onde lente associée à l'EIT et les applications de détection d'indice. Travailler avec un seul type de méta-atomes facilite inévitablement le processus de fabrication en hautes fréquences comme le térahertz (THz) ou les domaines de l'optique. Ici, nous validons la conception de méta-atome Z pour l'excitation du mode piégé aux fréquences micro-ondes en raison de la facilité de vérification expérimentale. Cependant, la conception des structures et les comportements associés restent valables pour les longueurs d'onde beaucoup plus petites.

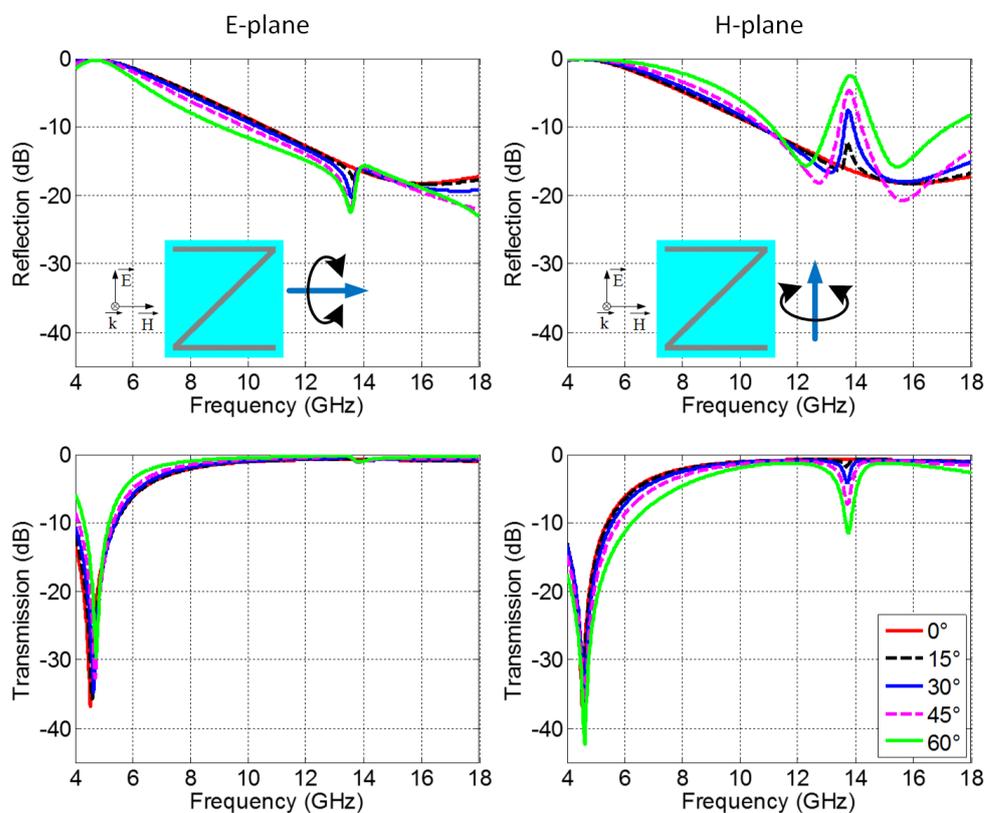


FIGURE 2.3.6: Réflexion et transmission pour la configuration I.

Deux types de polarisation du champ sont considérés, et pour chaque cas, nous explorons les caractéristiques du résonateur sous incidences normale et oblique dans les plans E et H. La réflexion et la transmission dans la première configuration (donnée dans l'encart) sont présentées sur la Fig. 2.3.6. Pour tous les angles d'incidence, une résonance est obtenue environ 4,6 GHz. La répartition du courant instantané illustrée sur la Fig. 2.3.7(a), indique qu'il correspond en effet à la plus faible fréquence de LC

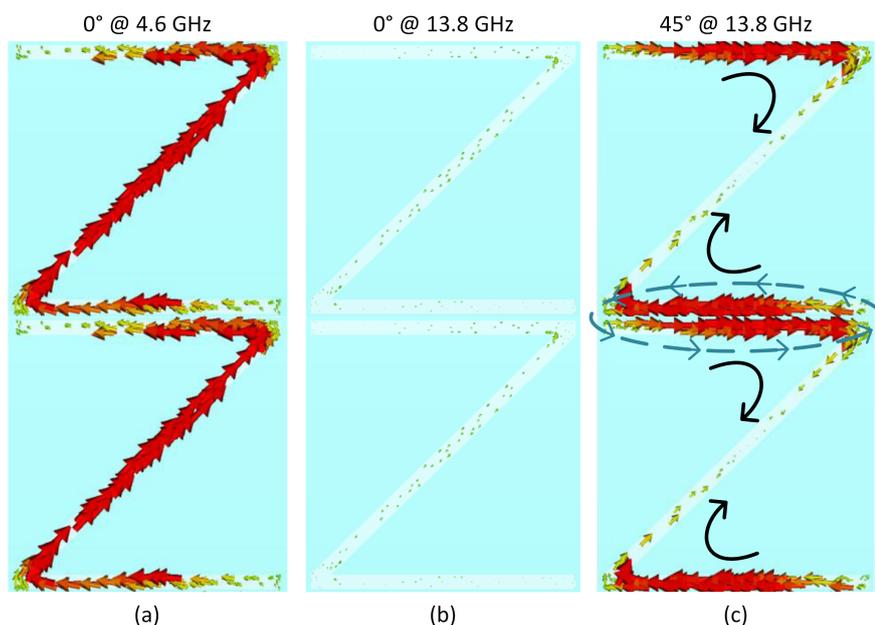


FIGURE 2.3.7: Distribution de courant pour la configuration I.

de la méta-atome Z. Pour l'incidence oblique, l'excitation d'une résonance supplémentaire peut être observée dans la réponse de réflexion à environ 13,8 GHz. Son origine est liée à l'excitation d'un mode sombre se produisant à cette fréquence. Pour expliquer l'excitation de ce mode piégé, le résonateur Z est considéré comme un arrangement de deux antennes V [Yu 11]. En raison de l'inversion de la symétrie du Z, les moments dipolaires des modes anti-symétriques des deux antennes V sont dirigés dans des directions opposées et s'annulent parfaitement sous incidence normale. Comme le confirme la répartition du courant de la Fig. 2.3.7(b) pour une incidence normale, la circulation du courant est extrêmement faible à 13,8 GHz, ce qui signifie que le mode n'est pas excité et reste sombre à cette fréquence.

L'excitation du mode piégé devient possible sous incidence oblique. Elle est très efficace dans le plan H, mais moins dans le plan E. En effet, la distribution du courant sur la Fig. 2.3.7(c) à 13,8 GHz sous une incidence de 45° dans le plan H montre la présence d'un moment dipolaire magnétique induite dans les boucles formées par la capacitance entre les bras couplés de deux résonateurs Z. Comme cela a été mis en évidence dans des études antérieures, l'interaction entre une résonance interdite de mode sombre et une autorisée de mode clair donne lieu à la résonance de Fano [Miroshnichenko 10, Luk'yanchuk 10]. L'interférence de ces deux modes peut entraîner soit une forte augmentation (interférence constructive) ou une forte annulation (interférence destructive) du champ électromagnétique. L'équilibre des courants opposés induits par le champ électrique est rompu pour une interférence destructive et donne lieu à l'excitation du mode anti-symétrique de l'antenne V, qui autrement est interdit sous incidence normale. L'excitation du mode

sombre dans ce cas provoque l'apparition d'une résonance étroite dans la réflexion, nommée par analogie à la réflexion électromagnétiquement induite (EIR). L'amplitude de cette résonance augmente avec l'angle de l'incidence oblique.

Il n'y a pas ce type d'interaction des moments dipolaire magnétique autorisé et électrique interdit sous l'incidence oblique dans le plan E. La direction du moment magnétique induit par la composante du champ électrique est toujours orthogonale à la composante magnétique du champ incident. La faible excitation de la résonance à 13,8 GHz est attribuée au retard de phase causé par la position spatiale différente des deux antennes V. L'excitation du mode sombre est donc interdit principalement pour l'incidence oblique dans le plan E.

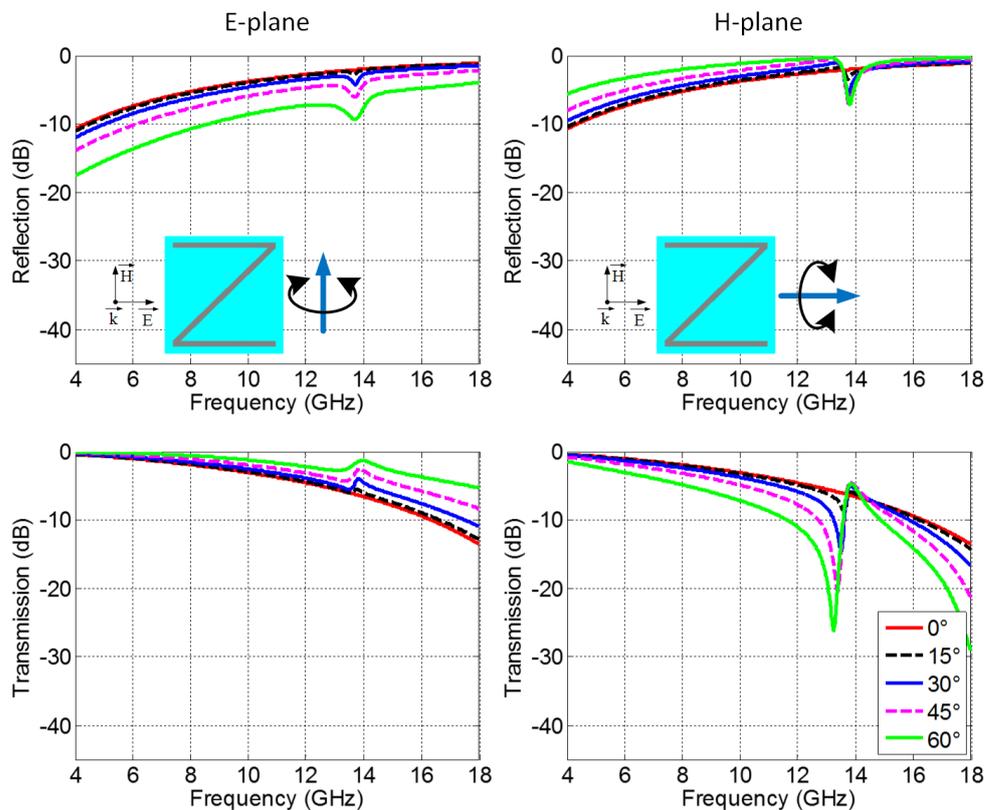


FIGURE 2.3.8: Réflexion et transmission pour la configuration II.

La réflexion et la transmission dans la deuxième configuration (donnée dans l'encart) sont présentées sur la Fig. 2.3.8. Pour une incidence normale, nous observons une résonance dans la transmission à 20 GHz, correspondant à l'excitation du mode symétrique de l'antenne V. Comme nous l'avons expliqué précédemment, le mode anti-symétrique de l'antenne V à 13,8 GHz est sombre et est excité qu'en incidence oblique. Comme dans la première configuration, l'excitation du mode sombre est très efficace sous incidence oblique dans le plan H et beaucoup moins dans le plan E et le mécanisme responsable

de l'excitation du mode sombre est le même. Cependant par rapport à la première configuration, l'excitation du mode sombre conduit dans ce cas à l'apparition du pic dans la transmission dans une bande étroite de fréquence, analogue à la transparence électromagnétiquement induite (EIT). Pour l'incidence oblique dans le plan E, nous avons une très faible excitation du mode sombre, attribuée au retard de phase causé par la position spatiale différente des deux antennes V.

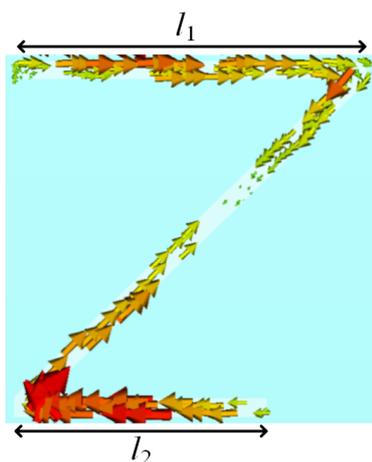


FIGURE 2.3.9: Distribution de courant pour le Z asymétrique.

Les résultats ci-dessus ont confirmé l'excitation d'un mode sombre sous incidence oblique. Toutefois, une méthode existe aussi pour exciter le mode sombre dans le méta-atome Z sous incidence normale. Il consiste à appliquer des longueurs différentes pour les deux bras horizontaux. Lorsque l_2 est différente de l_1 qui est fixé à 5,7 mm comme indiqué sur la Fig. 2.3.9, l'orientation du moment dipolaire de deux antennes V ne sont plus colinéaires et ne s'annulent plus mutuellement. L'équilibre des courants opposés induits par le champ électrique est brisé et nous avons une distribution de courant semblable à l'incidence oblique sur le Z symétrique. Elle se traduit par l'excitation du mode anti-symétrique de l'antenne V, qui est par ailleurs interdit pour $l_2 = l_1$ et entraîne l'apparition d'une résonance étroite illustré sur la Fig. 2.3.10. L'EIR observée pour la polarisation du champ incident dans le cas I montre une résonance asymétrique de Fano bien prononcée.

En revanche, l'excitation de l'EIT sous incidence normale causée par la brisure de symétrie est plus efficace par rapport au mécanisme d'excitation en incidence oblique dans le plan H sur le Z symétrique. Le degré d'asymétrie du Z et la polarisation de l'onde incidente donne les moyens de contrôle et d'excitation sélective de l'EIR ou de l'EIT selon les applications cibles. La transposition en fréquences permettra de réaliser une opération similaire sur des résonateurs Z en THz ou en IR ou même encore dans le visible. L'utilisation des résonances étroites dans ces domaines spectraux peut être très intéressant pour des applications de détection d'indice où les méta-atomes Z sont

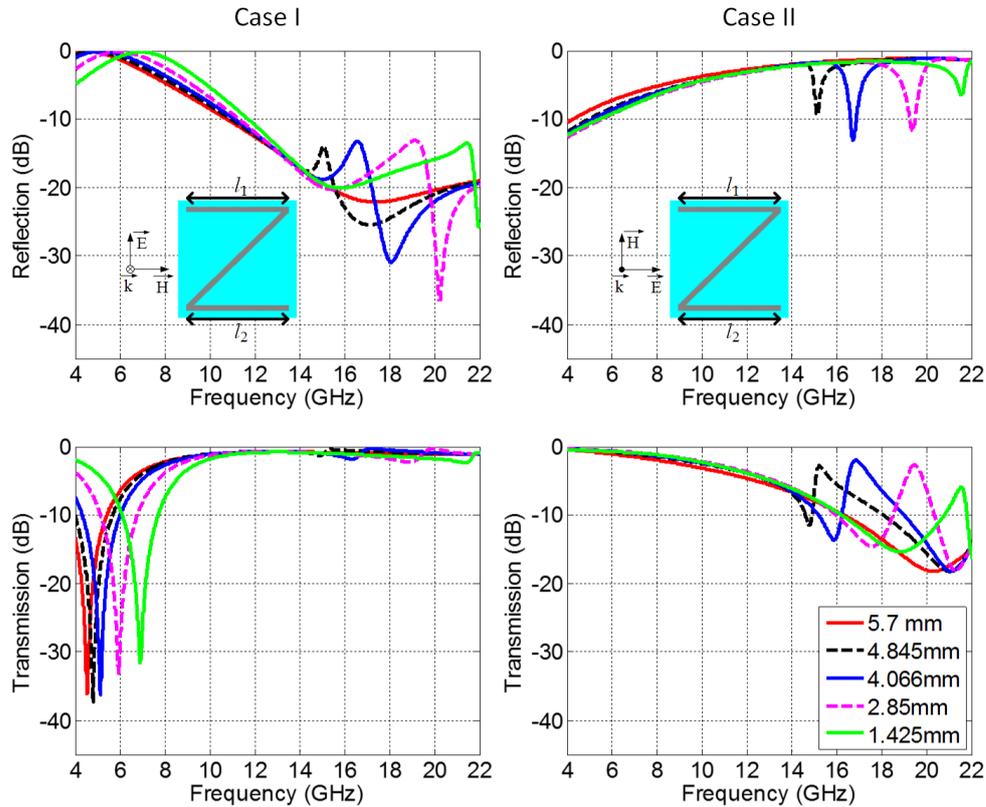


FIGURE 2.3.10: Réflexion et transmission en incidence normale pour le Z asymétrique.

les candidats prometteurs en raison de la simplicité de leur conception, composée d'un seul élément, ce qui permet une réalisation technologique plus simple.

2.4 Conclusion et perspectives

Les travaux que j'ai présentés dans ce chapitre concernent le développement de métamatériaux. Dans un premier temps, j'ai abordé le sujet des fils coupés asymétriques où j'ai présenté nos résultats majeurs obtenus. En effet, comme apport important dans le domaine, nous avons montré comment obtenir simultanément une permittivité et une perméabilité négatives, et donc un indice de réfraction négatif à partir d'une paire de fils coupés. La technique consiste à briser la symétrie dans la structure. Dans ce cas, on peut changer la nature des interactions de Coulomb présentes dans la structure et transformer une force initialement attractive en force répulsive et vice versa. Cette inversion des interactions de Coulomb se traduit par l'inversion du schéma d'hybridation et donc par l'inversion des modes symétriques et anti-symétrique dans le spectre de fréquences.

J'ai par la suite présenté le résonateur en forme de « Z » qui permet d'avoir une permittivité négative. Cependant, le manque de symétrie dans la structure nous a amené

à étudier les polarisations croisées et le couplage magnéto-électrique. Ces deux études ont montré que la structure Z n'est pas chirale et qu'un couplage magnéto-électrique apparaît au-dessus de la résonance fondamentale où la permittivité est négative. Ces résultats poussent à dire que le résonateur Z peut être très intéressant pour son fort rapport de milieu effectif λ/a et sa géométrie très simple sans gap capacitif comparé à l'ELC.

Nous avons aussi montré comment le Z par rapport à sa géométrie à inversion de symétrie peut être très intéressant dans le domaine des résonances de Fano. En effet, au lieu d'utiliser deux résonateurs pour l'interaction entre une résonance interdite de mode sombre et une autorisée de mode clair pour donner lieu à la résonance de Fano, le résonateur en un élément unique permet cette interaction. Deux configurations ont été présentées pour l'excitation du mode sombre dans le Z :

- en incidence oblique pour un Z dont les deux bras horizontaux sont de mêmes longueurs
- en incidence normale pour un Z dont les deux bras horizontaux sont de différentes longueurs

Ces deux résonateurs, la paire de fils coupés asymétriques et le Z, sont des candidats prometteurs pour leurs caractéristiques typiques à plus hautes fréquences dans le domaine de l'optique. En effet, les fils coupés possèdent une très faible partie métallique, ce qui représenterait moins de pertes en optique. Pour sa part, le résonateur Z est un élément très simple à fabriquer et permet à lui seul l'excitation de modes piégés.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus de recherches personnelles à la suite de ma thèse, de la thèse d'A. Dhouibi et d'un stage. Les travaux sur les Z ont été effectués dans le cadre d'un projet financé par la fondation EADS et a fait l'objet de plusieurs publications et communications. La partie sur les fils coupés a fait l'objet d'un chapitre d'ouvrage et de nombreuses publications dans des revues et des conférences. Par conséquent, je remercie très sincèrement les étudiants qui ont participé à ces travaux.

D'autres travaux sur le développement de structures à métamatériaux sont actuellement en cours pour obtenir un fonctionnement large bande. Cette partie sera présentée dans le chapitre 4.

Bibliographie

- [Aydin 10] K. Aydin, I.M. Pryce & H.A. Atwater. *Symmetry breaking and strong coupling in planar optical metamaterials*. Optics Express, vol. 18, no. 13, pages 13407–13417, 2010.
- [Benisty 09] H. Benisty. *Dark modes, slow modes, and coupling in multimode systems*. Journal of Optical Society of America B, vol. 26, no. 4, pages 718–724, 2009.
- [Burokur 05] S.N. Burokur. *Mise en oeuvre de métamatériaux en vue d'application aux circuits microondes et aux antennes*. PhD thesis, Université de Nantes, 2005.
- [Burokur 09a] S.N. Burokur, T. Lepetit & A. de Lustrac. *Incidence dependence of negative index in asymmetric cut wire pairs metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 95, no. 19, page 191114, 2009.
- [Burokur 09b] S.N. Burokur, A. Sellier, B. Kanté & A. de Lustrac. *Symmetry breaking in metallic cut wire pairs metamaterials for negative refractive index*. Applied Physics Letters, vol. 94, no. 20, page 201111, 2009.
- [Caloz 05] C. Caloz, A. Lai & T. Itoh. *The challenge of homogenization in metamaterials*. New Journal of Physics, vol. 7, no. 1, page 167, 2005.
- [Christ 07] A. Christ, Y. Ekinici, H.H. Solak, N.A. Gippius, S.G. Tikhodeev & O.J.F. Martin. *Controlling the Fano interference in a plasmonic lattice*. Physical Review B, vol. 76, page 201405, 2007.
- [de Lustrac 12] A. de Lustrac, S.N. Burokur, B. Kanté, A. Sellier & D. Germain. *Metamaterial, chapitre Design and characterization of metamaterials for optical and radio communications*, pages 269–302. InTech, 2012.
- [Dhouibi 12a] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Comparison of compact electric-LC resonators for negative permittivity metamaterials*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 54, no. 10, pages 2287–2295, 2012.
- [Dhouibi 12b] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom*. Advanced Electromagnetics, vol. 1, no. 2, pages 64–70, 2012.

- [Dhouibi 12c] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Z-shaped meta-atom for negative permittivity metamaterials*. Applied Physics A, vol. 106, no. 1, pages 47–51, 2012.
- [Dhouibi 13] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. Lupu, A. de Lustrac & A. Priou. *Excitation of trapped modes from a metasurface composed of only Z-shaped meta-atoms*. Applied Physics Letters, vol. 103, no. 18, page 184103, 2013.
- [Djermoun 05] A. Djermoun. *Simulation, réalisation et caractérisation des métamatériaux en micro-ondes*. PhD thesis, Université Paris 10, 2005.
- [Dolling 05] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, J.F. Zhou, C.M. Soukoulis & S. Linden. *Cut-wire pairs and plate pairs as magnetic atoms for optical metamaterials*. Optics Letters, vol. 30, no. 23, pages 3198–3200, 2005.
- [Dolling 07] G. Dolling, M. Wegener, C.M. Soukoulis & S. Linden. *Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength*. Optics Letters, vol. 32, no. 1, pages 53–55, 2007.
- [Dong 10] Z.-G. Dong, H. Liu, M.-X. Xu, T. Li, S.-M. Wang, J.-X. Cao, S.-N. Zhu & X. Zhang. *Role of asymmetric environment on the dark mode excitation in metamaterial analogue of electromagnetically-induced transparency*. Optics Express, vol. 18, no. 21, pages 22412–22417, 2010.
- [Fedotov 07] V.A. Fedotov, M. Rose, S.L. Prosvirnin, N. Papasimakis & N.I. Zheludev. *Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry*. Physical Review Letters, vol. 99, page 147401, 2007.
- [Fleischhauer 05] M. Fleischhauer, A. Imamoglu & J.P. Marangos. *Electromagnetically induced transparency : Optics in coherent media*. Reviews of Modern Physics, vol. 77, pages 633–673, 2005.
- [Kafesaki 07] M. Kafesaki, I. Tsiapa, N. Katsarakis, T. Koschny, C.M. Soukoulis & E.N. Economou. *Left-handed metamaterials : The fishnet structure and its variations*. Physical Review B, vol. 75, page 235114, 2007.
- [Kanté 09] B. Kanté, S.N. Burokur, A. Sellier, A. de Lustrac & J.-M. Lourtioz. *Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials*. Physical Review B, vol. 79, page 075121, 2009.

-
- [Koschny 05] T. Koschny, P. Markoš, E.N. Economou, D.R. Smith, D.C. Vier & C.M. Soukoulis. *Impact of inherent periodic structure on effective medium description of left-handed and related metamaterials*. Physical Review B, vol. 71, page 245105, 2005.
- [Leonhardt 06] Ulf Leonhardt. *Optical conformal mapping*. Science, vol. 312, no. 5781, pages 1777–1780, 2006.
- [Linden 04] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny & C.M. Soukoulis. *Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz*. Science, vol. 306, no. 5700, pages 1351–1353, 2004.
- [Liu 07b] R. Liu, A. Degiron, J.J. Mock & D.R. Smith. *Negative index material composed of electric and magnetic resonators*. Applied Physics Letters, vol. 90, no. 26, page 263504, 2007.
- [Liu 09] R. Liu, Q. Cheng, J.Y. Chin, J.J. Mock, T.J. Cui & D.R. Smith. *Broadband gradient index microwave quasi-optical elements based on non-resonant metamaterials*. Optics Express, vol. 17, no. 23, pages 21030–21041, 2009.
- [Liu 10] N. Liu, T. Weiss, M. Mesch, L. Langguth, U. Eigenthaler, M. Hirscher, C. Sönnichsen & H. Giessen. *Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing*. Nano Letters, vol. 10, no. 4, pages 1103–1107, 2010.
- [Liu 11] S.-D. Liu, Z. Yang, R.-P. Liu & X.-Y. Li. *Plasmonic-induced optical transparency in the near-infrared and visible range with double split nanoring cavity*. Optics Express, vol. 19, no. 16, pages 15363–15370, 2011.
- [Luk'yanchuk 10] B. Luk'yanchuk, N.I. Zheludev, S.A. Maier, N.J. Halas, P. Nordlander, H. Giessen & C.T. Chong. *The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials*. Nature Materials, vol. 9, no. 9, pages 707–715, 2010.
- [Miroshnichenko 10] A.E. Miroshnichenko, S. Flach & Y.S. Kivshar. *Fano resonances in nanoscale structures*. Reviews of Modern Physics, vol. 82, pages 2257–2298, 2010.
- [Neu 10] J. Neu, B. Krolla, O. Paul, B. Reinhard, R. Beigang & M. Rahm. *Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range*. Optics Express, vol. 18, no. 26, pages 27748–27757, 2010.

- [Nicolson 70] A.M. Nicolson & G.F. Ross. *Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 4, pages 377–382, 1970.
- [Papasimakis 08] N. Papasimakis, V.A. Fedotov, N.I. Zheludev & S.L. Prosvirnin. *Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency*. Physical Review Letters, vol. 101, page 253903, 2008.
- [Papasimakis 09] N. Papasimakis, Y.H. Fu, V.A. Fedotov, S.L. Prosvirnin, D.P. Tsai & N.I. Zheludev. *Metamaterial with polarization and direction insensitive resonant transmission response mimicking electromagnetically induced transparency*. Applied Physics Letters, vol. 94, no. 21, page 211902, 2009.
- [Pendry 96] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart & I. Youngs. *Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures*. Physical Review Letters, vol. 76, pages 4773–4776, 1996.
- [Pendry 98] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins & W.J. Stewart. *Low frequency plasmons in thin-wire structures*. Journal of Physics : Condensed Matter, vol. 10, no. 22, pages 4785–4809, 1998.
- [Pendry 99] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins & W.J. Stewart. *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 11, pages 2075–2084, 1999.
- [Pendry 00] J.B. Pendry. *Negative refraction makes a perfect lens*. Physical Review Letters, vol. 85, pages 3966–3969, 2000.
- [Pendry 06] J.B. Pendry, D. Schurig & D.R. Smith. *Controlling electromagnetic fields*. Science, vol. 312, no. 5781, pages 1780–1782, 2006.
- [Petit 80] R. Petit. *Electromagnetic theory of gratings*. Springer-Verlag, 1980.
- [Schurig 06a] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr & D.R. Smith. *Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies*. Science, vol. 314, no. 5801, pages 977–980, 2006.
- [Schurig 06b] D. Schurig, J.J. Mock & D.R. Smith. *Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 88, no. 4, page 041109, 2006.

-
- [Sellier 09] A. Sellier, S.N. Burokur, B. Kanté & A. de Lustrac. *Negative refractive index metamaterials using only metallic cut wires*. Optics Express, vol. 17, no. 8, pages 6301–6310, 2009.
- [Seo 12] B.-J. Seo, K. Kim, S.G. Kim, A. Kim, H. Cho & E. Choi. *Observation of trapped-modes excited in double-layered symmetric electric ring resonators*. Journal of Applied Physics, vol. 111, no. 11, page 113106, 2012.
- [Shalaev 05] V.M. Shalaev, W. Cai, U.K. Chettiar, H.-K. Yuan, A.K. Sarychev, V.P. Drachev & A.V. Kildishev. *Negative index of refraction in optical metamaterials*. Optics Letters, vol. 30, no. 24, pages 3356–3358, 2005.
- [Shalaev 07] V.M. Shalaev. *Optical negative-index metamaterials*. Nature Photonics, vol. 1, no. 1, pages 41–48, 2007.
- [Shao 13] J. Shao, J. Li, J. Li, Y.-K. Wang, Z.-G. Dong, P. Chen, R.-X. Wu & Y. Zhai. *Analogue of electromagnetically induced transparency by doubly degenerate modes in a U-shaped metamaterial*. Applied Physics Letters, vol. 102, no. 3, page 034106, 2013.
- [Shelby 01] R.A. Shelby, D.R. Smith & S. Schultz. *Experimental verification of a negative index of refraction*. Science, vol. 292, no. 5514, pages 77–79, 2001.
- [Singh 11a] R. Singh, I.A.I. Al-Naib, M. Koch & W. Zhang. *Sharp Fano resonances in THz metamaterials*. Optics Express, vol. 19, no. 7, pages 6312–6319, 2011.
- [Singh 11b] R. Singh, I.A.I. Al-Naib, Y. Yang, D.R. Chowdhury, W. Cao, C. Rockstuhl, T. Ozaki, R. Morandotti & W. Zhang. *Observing metamaterial induced transparency in individual Fano resonators with broken symmetry*. Applied Physics Letters, vol. 99, no. 20, page 201107, 2011.
- [Smith 00] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser & S. Schultz. *Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity*. Physical Review Letters, vol. 84, pages 4184–4187, 2000.
- [Smith 04] D. R. Smith, J. B. Pendry & M. C. K. Wiltshire. *Metamaterials and negative refractive index*. Science, vol. 305, no. 5685, pages 788–792, 2004.

- [Smith 06] D.R. Smith, J. Gollub, J.J. Mock, W.J. Padilla & D. Schurig. *Calculation and measurement of bianisotropy in a split ring resonator metamaterial*. Journal of Applied Physics, vol. 100, no. 2, page 024507, 2006.
- [Veselago 68] V.G. Veselago. *The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ* . Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no. 4, pages 509–514, 1968.
- [Withayachumnankul 10] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux & D. Abbott. *Compact electric-LC resonators for metamaterials*. Optics Express, vol. 18, no. 25, pages 25912–25921, 2010.
- [Yeh 98] P. Yeh. *Optical waves in layered media*. Wiley, 1998.
- [Yen 04] T.J. Yen, W.J. Padilla, N. Fang, D.C. Vier, D.R. Smith, J.B. Pendry, D.N. Basov & X. Zhang. *Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials*. Science, vol. 303, no. 5663, pages 1494–1496, 2004.
- [Yu 11] N. Yu, P. Genevet, M.A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso & Z. Gaburro. *Light propagation with phase discontinuities : generalized laws of reflection and refraction*. Science, vol. 334, no. 6054, pages 333–337, 2011.
- [Zhou 06a] J. Zhou, E.N. Economou, T. Koschny & C.M. Soukoulis. *Unifying approach to left-handed material design*. Optics Letters, vol. 31, no. 24, pages 3620–3622, 2006.
- [Zhou 06b] J. Zhou, L. Zhang, G. Tuttle, T. Koschny & C.M. Soukoulis. *Negative index materials using simple short wire pairs*. Physical Review B, vol. 73, page 041101, 2006.
- [Zhou 09] J. Zhou, J. Dong, B. Wang, T. Koschny, M. Kafesaki & C.M. Soukoulis. *Negative refractive index due to chirality*. Physical Review B, vol. 79, page 121104, 2009.

Chapitre 3

Transformation optique et applications

3.1	Introduction	95
3.1.1	État de l'art et contexte	96
3.1.2	Objectifs et contributions	98
3.2	Conception d'antennes	99
3.2.1	Antenne directive	99
3.2.2	Antenne azimuthale	104
3.3	Changement d'apparence physique d'une source rayonnante	108
3.3.1	Agrandissement de la taille physique et création d'un rayonnement isotrope	108
3.3.2	Réduction de la taille physique et création d'une émission directive	113
3.3.3	Rayonnement multi-faisceaux en spirale	118
3.4	Conception d'une transition de guide d'ondes	122
3.4.1	Principe de fonctionnement	122
3.4.2	Performances de la transition	124
3.5	Conclusion et perspectives	127
	Bibliographie	128

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une partie des travaux effectués dans le cadre du thème 2. Il porte sur la mise en œuvre de dispositifs à l'aide de la technique appelée « transformation optique ». Ce terme est générale et s'applique pour tout type d'ondes, qu'elle soit un rayon lumineux, une onde électromagnétique ou acoustique. Nous présenterons dans un premier temps un état de l'art sur les dispositifs issus de la transformation optique parus dans la littérature. Bien évidemment, nous pouvons trouver beaucoup de publications portant sur cette technique, par exemple plus d'une centaine sur la cape d'invisibilité qui est le premier dispositif (et dispositif phare) présenté. Nous présenterons donc un état de l'art en se concentrant sur les publications majeures dans le domaine. Nous nous

efforcerons à bien décrire nos principales contributions dans ce domaine qui est en pleine effervescence. Ce chapitre est basé sur les travaux de thèse de P.-H Tichit [Tichit 12]. Je présenterai dans ce chapitre, les dispositifs que nous avons conçus : une antenne directive, des dispositifs pour augmenter et réduire la taille apparente d'une source rayonnante et un adaptateur de guide d'ondes. Certains de ses dispositifs ont été réalisés et caractérisés expérimentalement.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux cités ci-dessous :

Thèse soutenue	[T-1]
Thèse en cours	[T-4]
Post-Doctorat	[PstD-1]
Masters	[MR-1]
Chapitre	O-1, O-2, O-5
Revue internationale	RI-2, RI-6, RI-12, RI-13, RI-16, RI-18, RI-24, RI-26, RI-27, RI-29, RI-39, RI-42
Communications internationales	CI-3, CI-6, CI-9, CI-12, CI-15, CI-16, CI-17, CI-19, CI-44, CI-49, CI-51, CI-53, CI-54, CI-58, CI-60
Communications nationales	CN-6, CN-9, CN-10, CN-13, JS-4, JS-8, JS-9, JS-11
Communications invitées	Inv-2, Inv-3, Inv-4
Collaborations	NUS

3.1.1 État de l'art et contexte

En novembre 2006, la revue Science publiait la première cape d'invisibilité à base de métamatériaux sub-longueur d'ondes [Schurig 06b]. Réalisé par D. R. Smith et conçu théoriquement par J. B. Pendry, ce nouveau dispositif électromagnétique permet de rendre invisible un objet métallique par rapport à une onde électromagnétique incidente. Ce dispositif a éveillé l'intérêt de la communauté scientifique dans le domaine des métamatériaux. Quelques mois auparavant la même revue publiait une technique mathématique innovante et fascinante : la transformation optique ou la transformation de coordonnées spatiales [Pendry 06, Leonhardt 06a]. Cet outil formidablement puissant, basé sur la réinterprétation des équations de Maxwell, offre un énorme potentiel pour la conception de dispositifs aux propriétés extraordinaires. De plus, le couplage avec les structures à métamatériaux (c.f. chapitre 2) permet la réalisation de matériaux générés par ces transformations. À partir d'éléments sub-longueur d'onde, il est possible d'obtenir les distributions spatiales voulues de la permittivité ϵ et de la perméabilité μ offrant ainsi le potentiel de guider et contrôler le flux de l'énergie par cette ingénierie d'espace. La transformation optique a donc apporté une nouvelle vision à l'électromagnétisme. Analogue à la relativité générale où le temps et l'espace ne font plus qu'un et sont modifiés par l'énergie et la masse, la transformation optique montre qu'il est possible de déformer l'espace à volonté afin d'imposer une trajectoire désirée des rayons

lumineux. Cette ingénierie d'espace fournit un contrôle du flux lumineux jusqu'à une précision nanométrique. Ainsi la relativité générale trouve une application dans de nouveaux systèmes optiques basés sur la transformation d'espace où la lumière est guidée par les métamatériaux d'une manière contrôlée et prédéfinie.

Pour comprendre comment fonctionne la transformation optique, il faut savoir que la lumière se propage en général par chemin optique le plus court. Lorsque l'indice est une distribution complexe, la lumière ne se propage plus en ligne droite. On pourrait penser que cela n'est possible que dans la limite de l'optique géométrique, c'est à dire pour des longueurs d'ondes petites par rapport aux dimensions caractéristiques. En fait, les transformations de coordonnées spatiales fournissent les tenseurs de perméabilité et permittivité appropriés dû à l'invariance des équations de Maxwell dans ces transformations, ce qui rend possible le contrôle de la lumière à toute échelle, du macroscopique jusqu'au microscopique. En créant les distributions de permittivité et perméabilité, l'espace peut être déformé à volonté, rendant ainsi possible par exemple la création de trajectoire « fantaisistes » avec des indices pouvant être négatifs. Il en résulte ainsi l'obtention de systèmes électromagnétiques nouveaux par utilisation combinée des transformations d'espace et des métamatériaux. Les nombreuses recherches effectuées sur ce sujet depuis sept ans ont abouti à de nombreuses propositions de systèmes électromagnétiques complexes tels que :

- capes d'invisibilité [Schurig 06b, Cai 07a, Greenleaf 08, Yan 08, Li 08, Gaillot 08a, Liu 09, Gabrielli 09, Valentine 09, Kanté 09b, Ergin 10, Farhat 08]
- concentrateurs électromagnétiques [Jiang 08a, Luo 08a, Rahm 08c]
- rotateurs de champ électromagnétique [Chen 07a, Chen 09b]
- trous de verre [Greenleaf 07, Zhang 09]
- trous noirs (absorbant) [Narimanov 09a, Cheng 10]
- adaptateurs et coudes de guide d'ondes [Rahm 08a, Rahm 08b, Huangfu 09, Roberts 09b]
- dispositifs de leurre [Lai 09, Jiang 13]
- lentilles collimatrices et antennes [Guenneau 05, Kwon 08, Leonhardt 08, Kundtz 08, Luo 08b, Jiang 08b, Rahm 08a, Allen 09, Kong 09, Kundtz 10, Ma 09, Popa 09, Turpin 10, Ma 10, Quevedo-Teruel 13]

Bien que le concept était déjà connu depuis de nombreuses années [Tamm 24, Plebanski 60], l'introduction de la transformation optique en 2006 a contribué à ramener le correspondance entre la géométrie et les matériaux. De cette façon, le matériau peut être considéré comme une nouvelle géométrie et les informations sur la transformation de coordonnées spatiales sont données par les propriétés du matériau. Basé sur la réinterprétation de l'invariance des équations de Maxwell, le contrôle arbitraire du champ électromagnétique est rendu possible en introduisant une transformation de coordonnées spatiales spécifique qui transforme un espace initial en un autre contenant les propriétés virtuelles souhaitées. Parmi les classes de transformation dans la littérature, plusieurs possibilités sont disponibles pour la conception de structures électromagnétiques. Par exemple, les transformations continues ont été introduites par J. B. Pendry [Pendry 06] pour réaliser la première cape d'invisibilité, qui a conduit à des tenseurs par la permittivité et la perméabilité anisotropes et hétérogènes. Les trans-

formations continues offrent un avantage substantielle dans leur généralité d'applications. La contribution de ces transformations a été mise à profit dans de nombreux cas cités ci-dessus. En parallèle, U. Leonhardt [Leonhardt 06a] a proposé le concept de transformations conformes où les transformations obéissent au principe de Fermat et permettent la conception des dispositifs par l'utilisation de milieux diélectriques isotropes [Landy 09, Han 10, Schmiele 10, Turpin 10]. L'inconvénient principal de ce type de transformations, sont leurs exigences mathématiques souvent trop complexes pour réaliser les systèmes. En suivant cette idée, la transformation quasi-conforme a vu le jour [Li 08, Liu 09, Gabrielli 09, Valentine 09, Ergin 10, Chang 10], où une légère déformation de la transformation minimise l'anisotropie du matériau et permet une approximation de dispositif avec un milieu isotrope. D'autres travaux théoriques sont apparus sur la transformation espace-temps [Leonhardt 00, Bergamin 08, Crudo 09, Thompson 11], créant un lien avec la cosmologie et la mécanique céleste [Genov 09]. Pour terminer, la transformation de source a permis la conception des dispositifs avec une source incluse dans l'espace transformé [Luo 08b, Luo 08c, Allen 09, Popa 09].

Les applications pratiques de la transformation d'espace vont bien au-delà de l'invisibilité et ceci est plus particulièrement l'objet de ce chapitre. En effet, la théorie permet de contrôler la lumière d'une ultime manière en fournissant les distributions de ϵ et μ . En utilisant ces distributions, l'espace optique est modelé pour obtenir le flux de lumière souhaité. La difficulté ensuite consiste à trouver les bonnes transformations afin que la réalisation avec les métamatériaux soient possibles. Cette science de la lumière par transformation optique associée à l'utilisation des métamatériaux ouvre la voie à de nouvelles et fascinantes applications qui n'auraient pas pu être conçues autrement.

3.1.2 Objectifs et contributions

Dans ce chapitre, je présente nos travaux dans le domaine de la transformation optique, domaine où nous avons proposé le plus de concepts sur le plan national. Ces travaux ont été développés pendant la thèse de P.-H. Tichit que j'ai co-encadré et qui a été soutenue en 2012 [Tichit 12] et actuellement pendant son post-doc. Une nouvelle thèse aussi vient de commencer depuis novembre 2012 sur le sujet. Les objectifs de notre travail sont :

- proposer des nouveaux concepts d'antennes et de dispositifs micro-ondes
- mettre l'accent sur la réalisation, contrairement à la majorité des études de la littérature qui restent numériques
- valider les performances en caractérisation expérimentale

Dans ce chapitre, nous étudierons dans un premier temps numériquement et expérimentalement deux antennes. La première est une antenne directive qui est obtenue en transformant une onde cylindrique en onde plane. Cette idée a été poussée plus loin pour concevoir la deuxième antenne qui en plus d'être directive, permet de dépointer le faisceau.

Nous présenterons ensuite le changement d'apparence de sources rayonnantes. Nous montrerons ainsi comment convertir une ouverture physique de grande taille en une de petite taille, c'est à dire transformer une source directive en une émission quasi-isotrope. Ce deuxième concept a été validé expérimentalement. Nous présenterons aussi l'opposé,

c'est à dire comment transformer une source isotrope en un rayonnement directif. Je présenterai ensuite l'étude théorique d'un dispositif qui permet d'émettre un rayonnement avec des faisceaux multiples suivant un trajet en spiral.

Je terminerai ce chapitre en présentant l'étude théorique d'un adaptateur de guide d'ondes. Ce dispositif n'a pas été réalisé en micro-ondes, mais est par contre sous étude en infrarouge au sein de notre équipe.

3.2 Conception d'antennes

Nous exposons dans cette section la conception et la fabrication d'antennes via la transformation optique. Elles sont réalisées à base de métamatériaux capables de transformer une source isotrope en un rayonnement directif. Après une présentation théorique du problème, je présenterai le milieu réalisé, capable de matérialiser la transformation. Des mesures en champ proche et en champ lointain viendront valider les études numériques.

3.2.1 Antenne directive

3.2.1.1 Méthodologie de conception

Pour concevoir l'antenne directive, nous transformons notre espace mathématique initial contenant un point source, afin que cette source devienne une source linéaire cohérente et directive comme représenté sur la Fig. 3.2.1 [Tichit 09, Tichit 11a]. Le concept est le suivant : imaginons une source ponctuelle émettant dans un espace euclidien vide à 2 dimensions. Les fronts d'ondes sont alors de forme cylindrique et une description avec des coordonnées polaires est alors appropriée. Transformons cet espace décrit en coordonnées polaires en un espace rectangulaire, comme illustré sur la Fig. 3.2.1. Les lignes radiales, repérées par des couleurs, vont se transformer dans l'espace rectangulaire en lignes horizontales de même couleur.

La source ponctuelle s'est transformée en une source linéique. Mathématiquement la transformation est exprimée comme :

$$\begin{cases} x' = \frac{2L}{d} \sqrt{x^2 + y^2} \\ y' = \frac{e}{\pi} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ z' = z \end{cases} \quad \text{avec } -\frac{\pi}{2} \leq \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.2.1)$$

où x' , y' et z' sont les coordonnées dans l'espace transformé et x , y et z sont celles dans l'espace initial. L'espace libre est attribué dans l'espace initial, avec les perméabilités et permittivités isotropes ϵ_0 et μ_0 . Les expressions suivantes sont utilisées pour obtenir des paramètres du matériau dans le nouvel espace rectangulaire :

$$\epsilon^{i'j'} = \psi^{i'j'} \epsilon_0 \quad \text{et} \quad \mu^{i'j'} = \psi^{i'j'} \mu_0 \quad \text{avec} \quad \psi^{i'j'} = \frac{J_i^{i'} J_j^{j'} \delta^{ij}}{\det(J)} J_\alpha^{\alpha'} \quad (3.2.2)$$

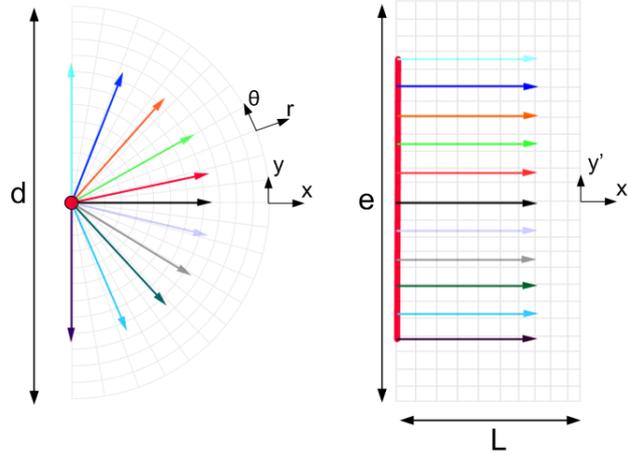


FIGURE 3.2.1: Principe de la transformation d'une source isotrope en un rayonnement directif.

où $J_{\alpha}^{\alpha'} = \frac{\partial x'^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}}$ et δ représente respectivement la matrice Jacobienne de la transformation donnée par l'Eq. 3.2.1 et le symbole de Kronecker. La matrice Jacobienne entre les coordonnées transformées et celles d'origine présente quatre composantes non-nulles qui dépendent de la distance à l'origine. Nous avons supposé une indépendance suivant z de J_{xx} , J_{yy} , J_{xy} avec $J_{zz} = 1$. La transformation inverse est obtenue à partir de la transformation 3.2.1 par substitution. Cette transformation inverse qui se rapproche d'une transformation conforme permet la conception du métamatériau et conduit à une permittivité faiblement anisotrope et inhomogène. Les deux paramètres électromagnétiques ϵ et μ suivent la même évolution.

En substituant le nouveau système de coordonnées dans les composantes du tenseur, et après quelques simplifications, les paramètres suivants sont obtenus :

$$\psi^{ij} = \begin{pmatrix} \psi_{xx}(x') & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\psi_{xx}(x')} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha\psi_{xx}(x') \end{pmatrix} \quad (3.2.3)$$

où $\psi_{xx}(x') = \pi x'/e$ et $\alpha = d^2/4L^2$, avec d représentant le diamètre de l'espace cylindrique initial et e et L , la largeur et la longueur respectives de l'espace rectangulaire.

Pour une réalisation pratique utilisant des métamatériaux, les dimensions de l'espace semi-cylindrique sont choisies de sorte que $\alpha = 4$ afin d'obtenir des valeurs réalisables pour les paramètres électromagnétiques. La simplification additionnelle résulte du choix de la polarisation de l'onde émise. Ici nous considérons une onde électromagnétique polarisée avec un champ électrique se dirigeant dans la direction z , qui permet de modifier l'équation de dispersion afin de simplifier les paramètres électromagnétiques sans changer les équations de Maxwell et la propagation dans la structure. Ceci mène à un

métamatériau qui est décrit par :

$$\mu_{xx} = 1, \mu_{yy} = \frac{1}{(\epsilon_{xx})^2}, \epsilon_{zz} = 4(\epsilon_{xx})^2 \quad (3.2.4)$$

avec $e = 0.15$ m.

3.2.1.2 Réalisation expérimentale

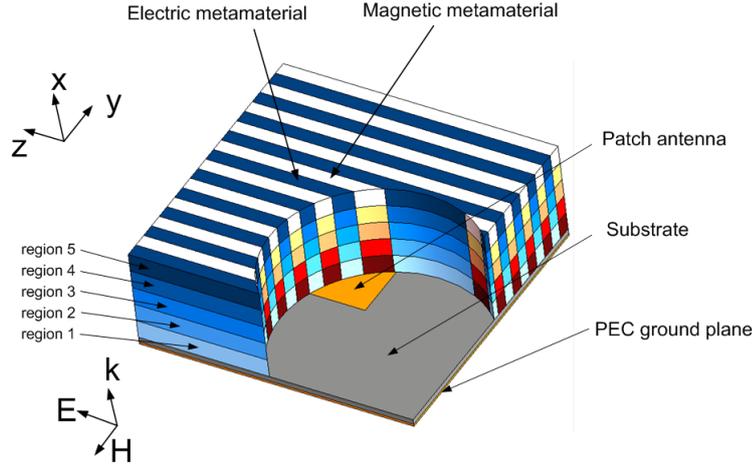


FIGURE 3.2.2: Schéma de principe de l'antenne directive.

Une solution possible est représentée sur la Fig. 3.2.2 où une alternance de couches de métamatériaux à résonances électriques et magnétiques permet l'obtention des valeurs obtenues par la transformation d'espace.

La Fig. 3.2.3(a) présente une photographie du prototype réalisé. Une antenne micro-ruban imprimée sur un substrat diélectrique à faible pertes d'épaisseur 0,787 mm (Rogers RT/Duroid 5870TM avec 17,5 μm d'épaisseur de cuivre, $\epsilon_r = 2,33$ et $\tan\delta = 0,0012$) est employée en tant que source rayonnante. Un milieu environnant composé d'alternance de couches de métamatériaux électriques et magnétiques transforme l'émission omnidirectionnelle de l'antenne micro-ruban en une émission directive. Ce matériau environnant est une structure discrète composée de cinq régions différentes où la permittivité et la perméabilité varient selon l'Eq. 3.2.4 et le profil de la Fig. 3.2.3(b). La permittivité axiale ϵ_{zz} et la perméabilité axiale μ_{yy} présentent des valeurs qui s'étendent respectivement de 0,12 à 4,15 et de 1,58 à 15,3. Le matériau est assemblé en utilisant 56 couches de substrats diélectriques sur lesquels des structures résonnantes sub-longueur d'onde sont imprimées. 28 couches contiennent des SRRs [Pendry 99] et 28 autres contiennent des ELCs [Schurig 06c] connus pour fournir une réponse respectivement magnétique et électrique (c.f. chapitre 2). Chaque couche est faite de 5 régions de métamatériaux correspondant aux valeurs discrétisées de la Fig. 3.2.3(b). En raison des contraintes du masque, nous avons choisi une cellule unité rectangulaire avec des dimensions 3,333 mm

pour les deux résonateurs. Le masque est composé de 5 régions, qui font chacune trois cellules unités longs (10 mm). Nous pouvons donc obtenir la ϵ_{zz} et la μ_{yy} désirées en accordant les paramètres géométriques des résonateurs. Les dimensions géométriques de ces derniers ont été calculées en ajustant la réponse électrique ou magnétique via le logiciel commercial *HFSS*.

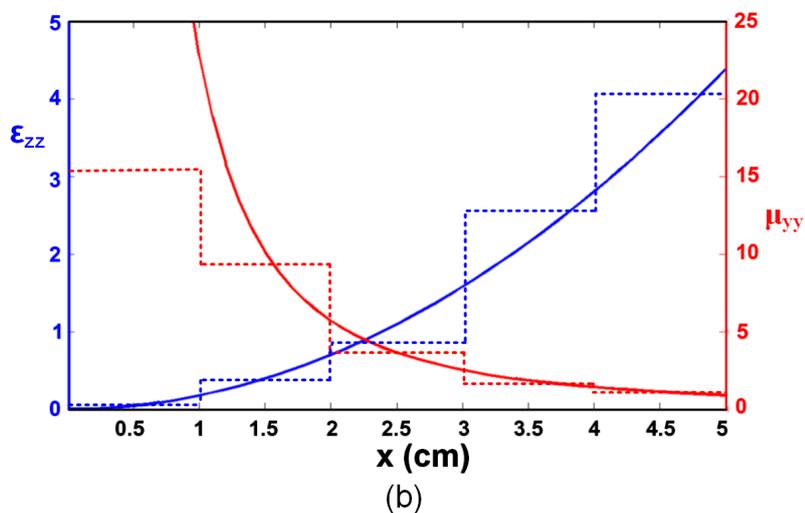
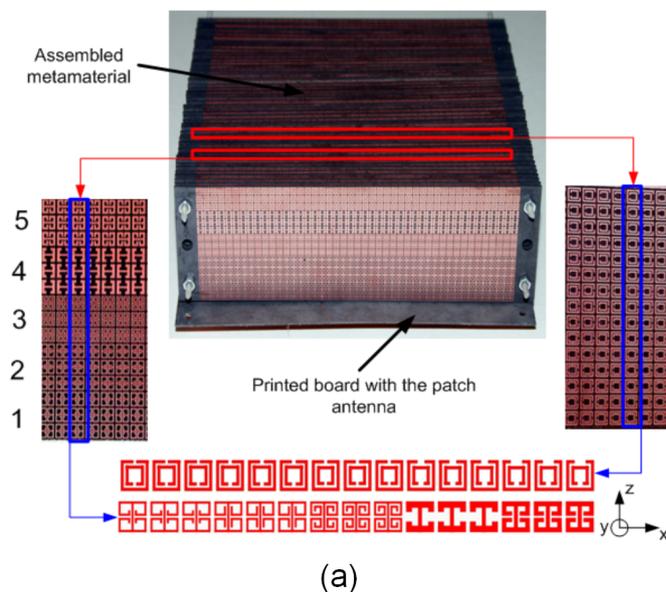


FIGURE 3.2.3: (a) Alternance de couches de résonateurs magnétiques et électriques assurant les variations de μ_{yy} et ϵ_{zz} nécessaires. (b) Paramètres discrets utilisés dans les mesures comparés à ceux donnés par l'Eq. 3.2.4.

3.2.1.3 Performances

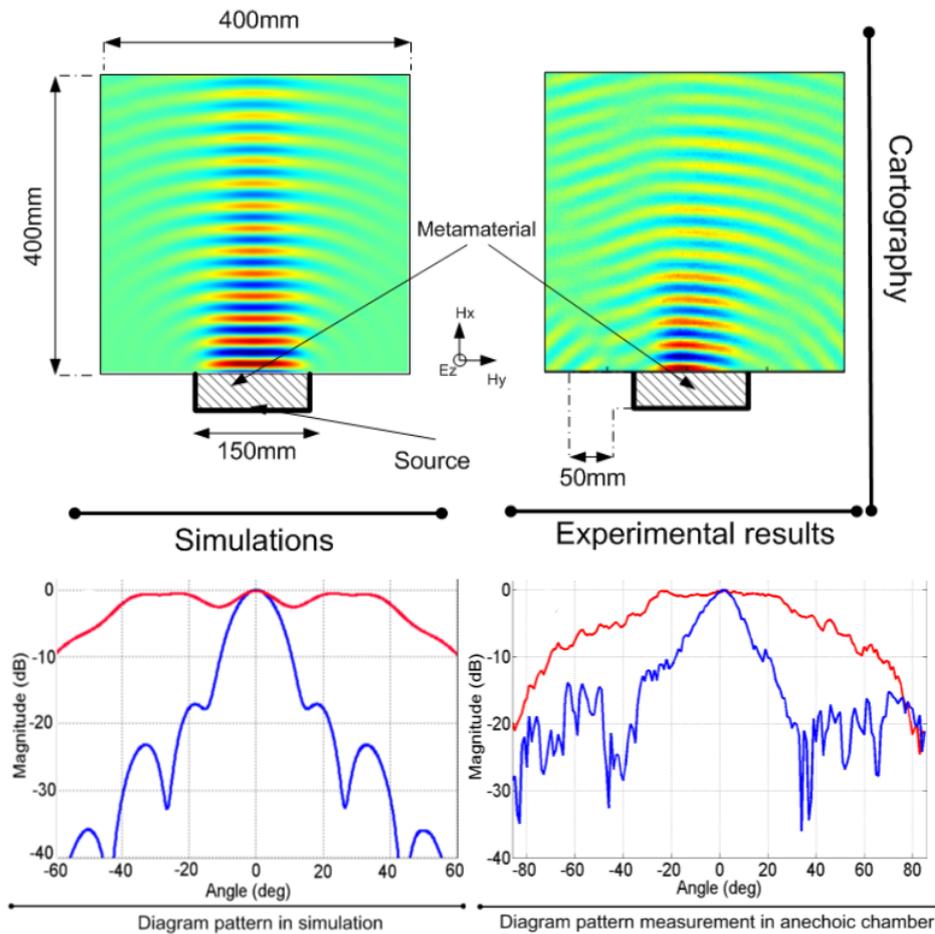


FIGURE 3.2.4: Comparaison simulation/expérience en champ proche et en champ lointain.

Afin de valider la démonstration de cette antenne directive, une antenne patch utilisée comme source isotrope est mise en interaction avec le métamatériau. Les couches de résonateurs électriques et magnétiques sont montées 2 par 2 avec un espacement constant d'air de 2,2 mm entre chacune. Les dimensions de l'antenne sont 15 cm × 15 cm × 5 cm. Des simulations numériques sont effectuées avec les paramètres discrets utilisant le logiciel commercial Comsol Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis dans une configuration 2D.

Deux types de mesures ont été effectués et présentés sur la Fig. 3.2.4 : une cartographie en champ proche ainsi que la mesure du diagramme de rayonnement en champ lointain. En ce qui concerne la cartographie en champ proche, nous utilisons une sonde montée sur une table de translation possédant deux bras pouvant être déplacés par motorisation. On

peut facilement observer le caractère directif du faisceau émanant de l'antenne conçue par la transformation optique. La Fig. 3.2.4 présente aussi le diagramme de rayonnement de l'antenne mesuré en comparaison avec le diagramme simulé. Un très bon accord est observé entre les simulations numériques et les mesures expérimentales effectuées. Les diagrammes de rayonnement montrent que l'antenne présente un angle d'ouverture à -3 dB de 13 degrés et des lobes secondaires inférieurs à -15 dB dans le plan H. Ce faisceau est comparable en terme de directivité à celui d'une antenne parabolique de dimensions équivalentes.

3.2.2 Antenne azimuthale

3.2.2.1 Méthodologie de conception

Ici, nous poussons l'idée de la transformation pour avoir une antenne directive un peu plus loin. En effet, nous avons transformé le rayonnement directif normal à la surface en un rayonnement toujours directif, mais dirigé et courbé à l'horizontal afin d'avoir une antenne azimuthale [Wu 12].

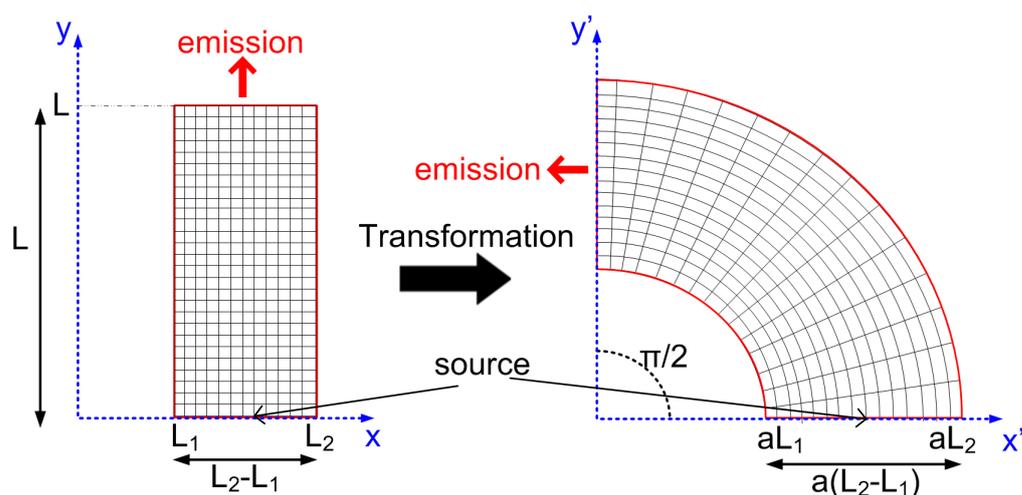


FIGURE 3.2.5: Principe de la transformation d'un rayonnement normal à une surface en un rayonnement azimuthal.

Nous proposons une transformation de coordonnées à deux dimensions, qui transforme le rayonnement vertical d'une source dans une émission directive azimuthale. Considérons une source rayonnant dans un espace rectangulaire. Théoriquement, ce rayonnement peut être transformé en un azimuthal utilisant l'optique de la transformation. La procédure de transformation est notée $F(x', y')$ et consiste à courber le rayonnement. La Fig. 3.2.5 montre le principe de fonctionnement de cette transformation de coordonnées

rotationnelle. Mathématiquement, $F(x', y')$ peut être exprimée comme :

$$\begin{cases} x' = ax \cos(by) \\ y' = ax \sin(by) \\ z' = z \end{cases} \quad (3.2.5)$$

où x' , y' et z' sont les coordonnées dans l'espace courbé et x , y et z sont celles dans l'espace initial (espace libre). L_2 - L_1 et L sont respectivement la largeur et la longueur de l'espace rectangulaire. La transformation rotationnelle de la Fig. 3.2.5 est définie par le paramètre a considéré comme un paramètre d'expansion et le paramètre b qui contrôle l'angle de rotation de la transformation $F(x', y')$.

Comme pour l'antenne directive, le nouveau matériau est défini par les tenseurs de permittivité et de perméabilité donnés par l'Eq. 3.2.2. La transformation inverse est obtenue à partir de la transformation 3.2.5 par substitution. En substituant le nouveau système de coordonnées dans les composantes du tenseur, et après quelques simplifications, les paramètres suivants sont obtenus :

$$\psi^{ij} = \begin{pmatrix} \psi_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \psi_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a}{br} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a}{b}r & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{abr} \end{pmatrix} \quad (3.2.6)$$

Pour avoir une idée des résultats attendus d'un prototype fabriqué physiquement, nous devons d'abord simplifier les paramètres du matériau calculés par la procédure de réduction de paramètres. Nous fixons donc une polarisation du champ électromagnétique dont le champ magnétique le long de l'axe z . Dans ce cas, les paramètres électromagnétiques sont μ_{zz} , $\epsilon_{\theta\theta}$ et ϵ_{rr} . Ainsi, nous décidons de maintenir μ_{zz} et $\epsilon_{\theta\theta}$ constantes. Par conséquent, le nouvel ensemble de coordonnées est :

$$\epsilon_{rr} = \frac{(1/br)^2}{1,7}, \quad \epsilon_{\theta\theta} = 2,8, \quad \mu_{zz} = 1,7 \quad (3.2.7)$$

Les valeurs de ϵ_{rr} et μ_{zz} ont été choisies afin qu'elles puissent être facilement réalisées avec des métamatériaux. $\epsilon_{\theta\theta}$ est produite par la milieu hôte, qui est une résine disponible dans le commerce. b est un paramètre physique permettant une optimisation de ϵ_{rr} .

3.2.2.2 Réalisation expérimentale

La Fig. 3.2.6(a) présente le profil des différents paramètres matériels résultant d'une optimisation pour $b = 6$. Les Fig. 3.2.6(b) et (c) montrent respectivement la distribution de champ électrique calculé et le diagramme de rayonnement où la courbure du faisceau peut être observée.

Une variation discrète de ϵ_{rr} est faite à base de structures à métamatériaux. Les paramètres du substrat diélectrique Rogers RT/Duroid 3003TM utilisé sont : épaisseur = 0,787 mm, $\epsilon_r = 3$ et $\tan\delta = 0,0013$.

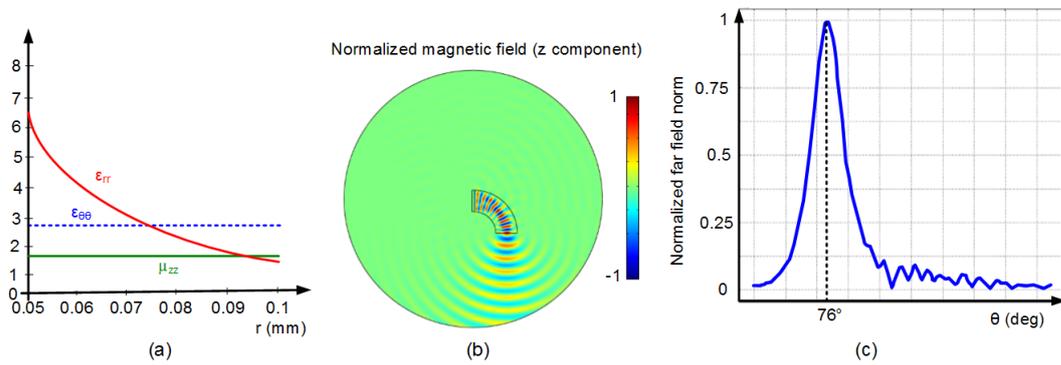


FIGURE 3.2.6: Profil des paramètres électromagnétiques réduits et résultats numériques de l'antenne azimuthale.

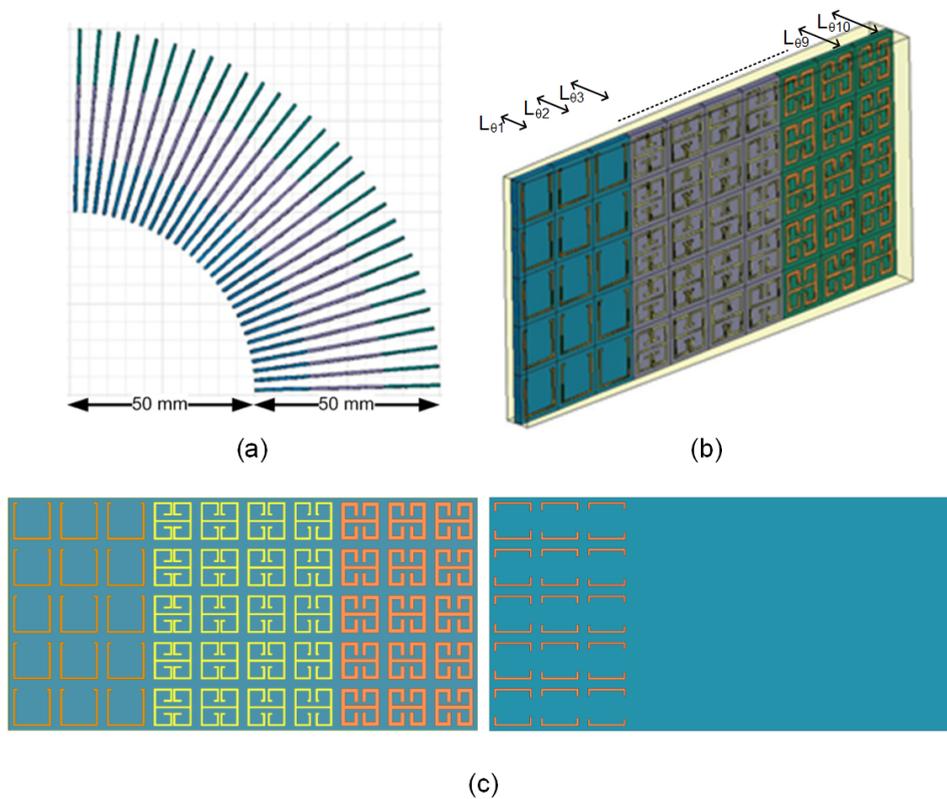


FIGURE 3.2.7: Structure proposée à base de lames composées de 10 cellules résonantes chacune.

Une réalisation de notre structure proposée utilise un matériau composite lamellaire comme illustré dans la Fig. 3.2.7(a). La structure proposée est alors composée de 30

couches identiques où chaque couche est divisée en 10 cellules. En raison de contraintes géométriques, nous choisissons une cellule rectangulaire avec des dimensions de 5 mm pour les résonateurs. ϵ_{rr} et μ_{zz} sont obtenues par le réglage des paramètres géométriques des résonateurs. Les 10 cellules présentées dans la Fig. 3.2.7(c) sont conçues pour constituer les variations discrètes de ϵ_{rr} .

3.2.2.3 Performances

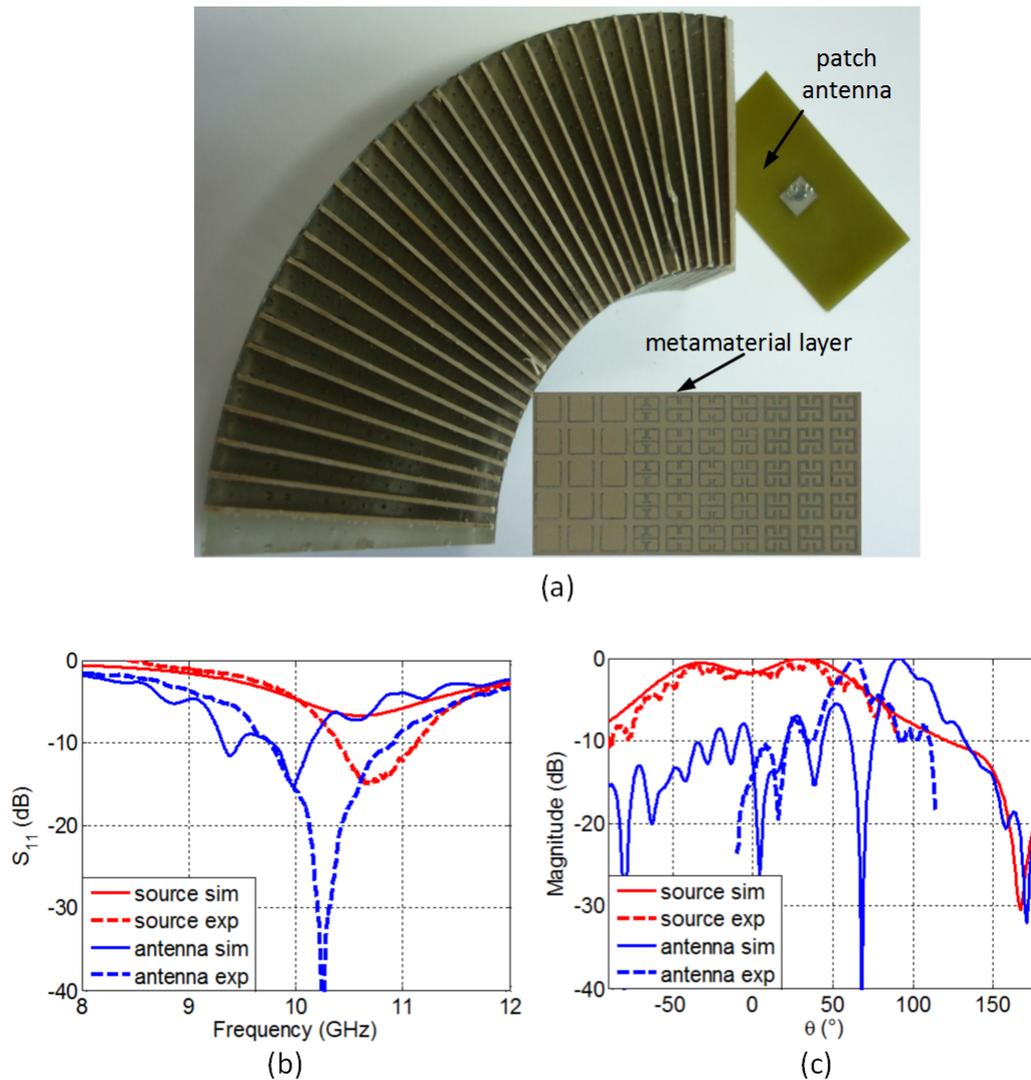


FIGURE 3.2.8: L'antenne azimuthale réalisée et les performances obtenues.

La Fig. 3.2.8(a) montre une photographie du prototype fabriqué. Une antenne imprimée micro-ruban est utilisée comme source de rayonnement. Un matériau environnant fait d'une alternance de couches métamatériau transforme l'émission omnidirectionnelle de la source en une émission directive orientée dans une direction oblique. Les lames de métamatériaux sont montées 1 par 1 dans une matrice moulée avec un angle constant de 3° entre chacune d'elle. Une résine liquide disponible dans le commerce est ensuite coulée dans le moule. Cette résine constitue le support de l'hôte et est un paramètre important de conception qui est étroitement lié à $\epsilon_{\theta\theta}$. Sa constante diélectrique mesurée est très proche de 2,8. Le moule est retiré après la solidification de la résine.

Les performances de l'antenne ont été validées par des mesures d'adaptation et de diagramme de rayonnement. Le paramètre S_{11} mesuré de l'antenne métamatériau est comparé avec celui simulé à l'aide de *HFSS* dans la Fig. 3.2.8(b). Un accord correcte peut être observé. Les diagrammes de rayonnement en champ lointain simulés et mesurés dans le plan E sont présentés dans la Fig. 3.2.8(c). Un lobe directif principal et des lobes secondaires parasites faibles, autour de -10 dB sont observées expérimentalement à un angle de 66° . Le lobe principal présente une ouverture à mi-puissance de 18° . On peut clairement observer la transformation du rayonnement omnidirectionnel de la source en un faisceau directif courbé à 66° . La différence de l'angle d'émission simulé et mesuré est due à des tolérances de fabrication des méta-atomes fournissant le gradient de la permittivité radiale. On notera également que les simulations *HFSS* montre une courbure de 90° du faisceau puisqu'aucun décalage spatial n'est considéré dans le calcul en champ lointain.

3.3 Changement d'apparence physique d'une source rayonnante

Nous exposons dans cette section la conception de dispositifs permettant de changer l'apparence physique de sources rayonnantes. Après une présentation théorique du problème, je présenterai les performances des dispositifs. L'idée ouvre la voie à des applications intéressantes dans des domaines variés en micro-ondes et en optique, mais aussi en acoustique.

3.3.1 Agrandissement de la taille physique et création d'un rayonnement isotrope

3.3.1.1 Méthodologie de conception

Nous exposons ici la conception d'un dispositif à base de métamatériaux capable de transformer une source directive en un rayonnement omnidirectionnel [Tichit 11b]. Cette manipulation est possible grâce aux métamatériaux composites qui correspondent à une extension de l'espace autour d'une source. Les performances de cette structure sont démontrées par des simulations numériques et validées par des mesures expérimentales. Nous montrons que le rayonnement directif d'une source de dimension supérieure à la

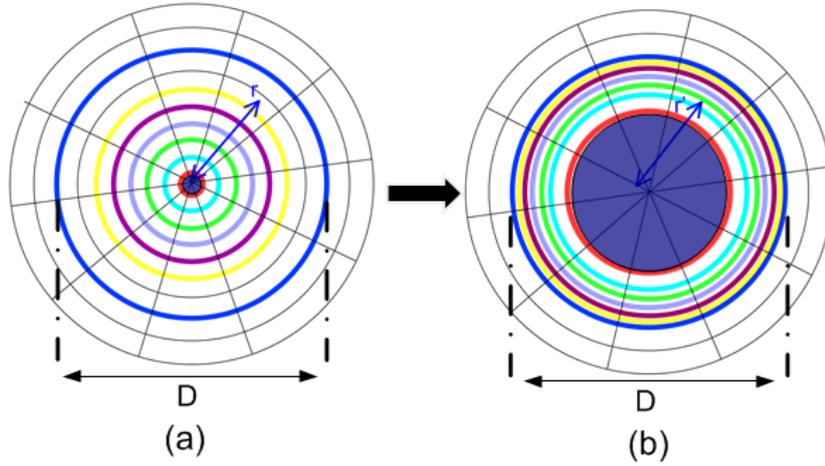


FIGURE 3.3.1: Principe de la transformation d'une source directive en un rayonnement omnidirectionnel.

longueur d'onde peut être transformé en un rayonnement omnidirectionnel en modifiant les propriétés électromagnétiques de l'espace qui l'entoure. En d'autres termes, nous agrandissons la taille physique de l'élément rayonnant puisque nous obtenons un rayonnement omnidirectionnel avec une source de grande taille.

Nous commençons par l'approche fondamentale de la transformation d'espace. Un schéma de principe pour illustrer la méthode proposée est présenté sur la Fig. 3.3.1. Considérons une source de rayonnement dans un espace décrit en coordonnées cylindriques comme illustré sur la Fig. 3.3.1(a), et une zone circulaire délimitée par le cercle bleu autour de cette source qui limite la zone de rayonnement. La transformation des coordonnées de l'étirement de l'espace consiste à étirer exponentiellement la zone centrale de cette zone circulaire délimitée, représenté par le cercle rouge, comme illustré sur la Fig. 3.3.1(b). La procédure d'extension est ensuite suivie d'une compression de la région annulaire entre les cercles rouges et bleus afin de garantir une bonne adaptation d'impédance avec l'espace libre. Le diamètre de l'espace transformé, qui sera le milieu à base de métamatériaux généré est noté D .

Mathématiquement, cette transformation est exprimée par :

$$\begin{cases} r' = \alpha (1 - \exp(qr)) \\ \theta' = \theta \\ z' = z \end{cases} \quad \text{avec } \alpha = \frac{D}{2} \frac{1}{1 - \exp(\frac{qD}{2})} \quad (3.3.1)$$

où r' , θ' et z' sont les coordonnées dans l'espace courbé et r , θ et z sont celles dans l'espace initial. Dans l'espace initial, nous supposons le vide. Il convient de noter que seul le paramètre q apparaît dans l'Eq. 3.3.1. q (en m^{-1}) est le facteur d'expansion et doit être négatif afin d'assurer le comportement décrit précédemment. Une valeur élevée

(négative) de q signifie un fort étirement, tandis qu'une faible valeur (négative) de q désigne un étirement très faible (proche de zéro).

Ensuite nous calculons les tenseurs de permittivité et de perméabilité dans le système de coordonnées (x', y') de manière à imiter l'espace transformé. A ce stade, nous avons conçu un matériau spécifique contenant les propriétés physiques souhaitées. La transformation inverse est obtenue à partir de la transformation initiale de l'Eq. 3.3.1 et par une méthode de substitution, qui permet de concevoir un métamatériau circulaire qui mène à des tenseurs de permittivité et de perméabilité anisotropes. Les tenseurs de perméabilité et de permittivité sont donnés dans la base diagonale par :

$$\psi^{ij} = \begin{pmatrix} \psi_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \psi_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{qr(r'-\alpha)}{r'} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r'}{qr(r'-\alpha)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{r'q(r'-\alpha)} \end{pmatrix} \quad (3.3.2)$$

où $r = \frac{\ln\left(1-\frac{r'}{\alpha}\right)}{q}$.

Au centre de l'espace transformé, ϵ et μ présentent des valeurs très faibles ($\ll 1$). Par conséquent, la vitesse de la lumière et la longueur d'onde correspondante sont beaucoup plus élevées que dans le vide. La largeur de la source apparaît alors très petite par rapport à la longueur d'onde et la source peut alors être considérée comme un fil rayonnant, qui est en fait une source isotrope. Cette transformation dépend ainsi de la valeur du facteur d'étirement q et plus généralement, il peut être appliqué à un large éventail d'objets électromagnétiques, où la taille effective peut être réduite par rapport à une longueur d'onde donnée.

En fixant le champ magnétique le long de l'axe z et en ajustant l'équation de dispersion sans modifier la propagation dans la structure, les paramètres réduits suivants peuvent être obtenus :

$$\mu_{zz} = 1, \quad \epsilon_{\theta\theta} = \left(\frac{r'}{qr(r'-\alpha)}\right)^2, \quad \epsilon_{rr} = \left(\frac{r}{r'}\right)^2 \quad (3.3.3)$$

3.3.1.2 Réalisation expérimentale

Un dipole imprimé sur un substrat diélectrique et fonctionnant à 10 GHz est utilisé comme la source de rayonnement le long de l'axe y (Fig. 3.3.2) [Tichit 13c]. Notre matériau environnant fait d'une alternance de couches de résonateurs électrique angulaire et radiale transforme l'émission directive dans le plan xOy du dipole en un rayonnement isotrope. On impose un champ électromagnétique polarisé sur l'axe z qui permet de fixer $\mu_{zz} = 1$ et de contrôler $\epsilon_{\theta\theta}$ et ϵ_{rr} . Nous avons réalisé le métamatériau en empilant 30 couches de diélectriques sur lesquelles sont imprimées les structures résonantes. 15 couches contiennent les ELCs qui assurent la permittivité radiale et les 15 autres couches contrôlent la permittivité angulaire (Fig. 3.3.3). Chaque couche est composé de 9 zones de cellules métamatériau représentant la répartition inhomogène des paramètres. Les couches sont empilées de façon alternée, avec un espacement d'air constant de 3,3 mm entre deux couches successives. Les dimensions du dispositif sont $R \times H = 5 \text{ cm} \times 12$

cm, où R et H représentent respectivement le rayon et la hauteur. Fig. 3.3.3(a) montre la cellule unité du métamatériau constituée avec deux types de résonateurs ELC comme indiqué sur la Fig. 3.3.3(b), afin de satisfaire les paramètres requis dans les directions radiales et angulaires, comme illustré sur la Fig. 3.3.3(c). La cellule métamatériau mis en œuvre n'est pas périodique, et deux types de résonateurs élémentaires sont optimisés en une seule fois, puisque des paramètres communs sont partagés. La distribution sur la Fig. 3.3.3(c) présente les paramètres des matériaux que nous avons discrétisés du profil continu de l'Eq. 3.3.3 dans neuf régions du métamatériau utilisé pour la validation expérimentale.

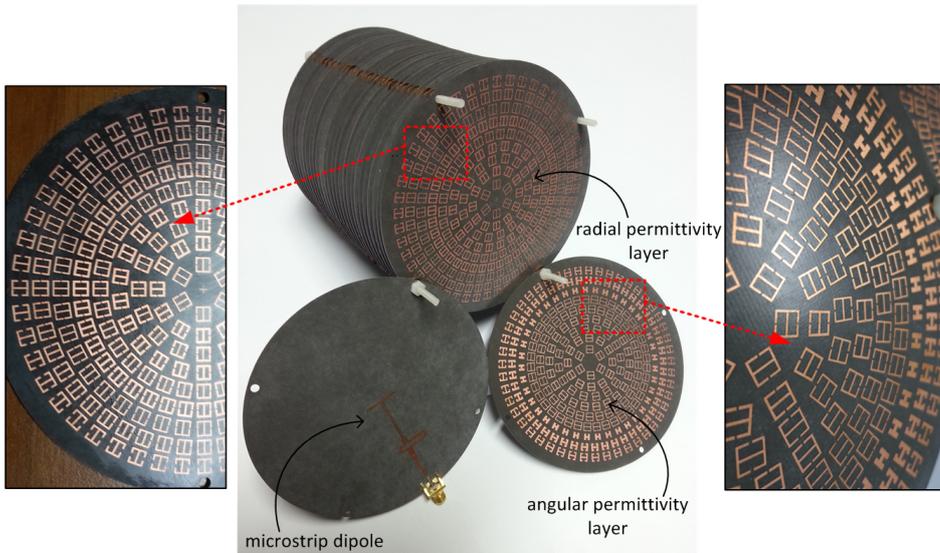


FIGURE 3.3.2: Photographie du prototype fabriqué pour démontrer le rayonnement isotrope.

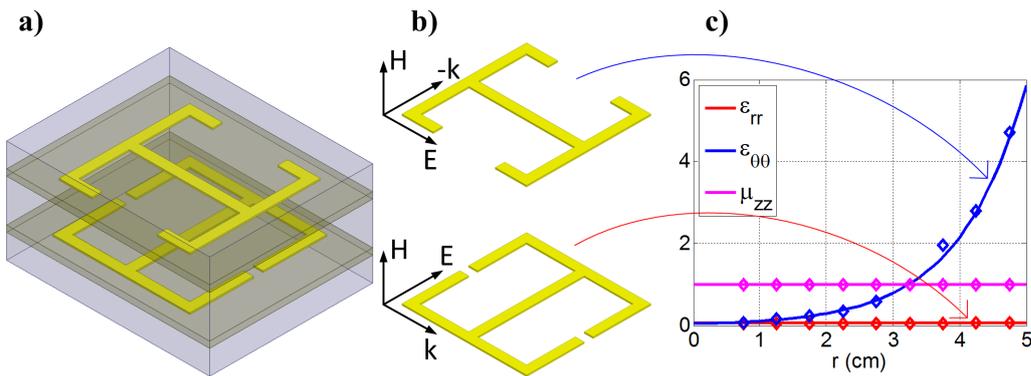


FIGURE 3.3.3: Cellule unité du métamatériau utilisé, composé de 2 ELCs permettant d'obtenir les valeurs de ϵ_{rr} et $\epsilon_{\theta\theta}$.

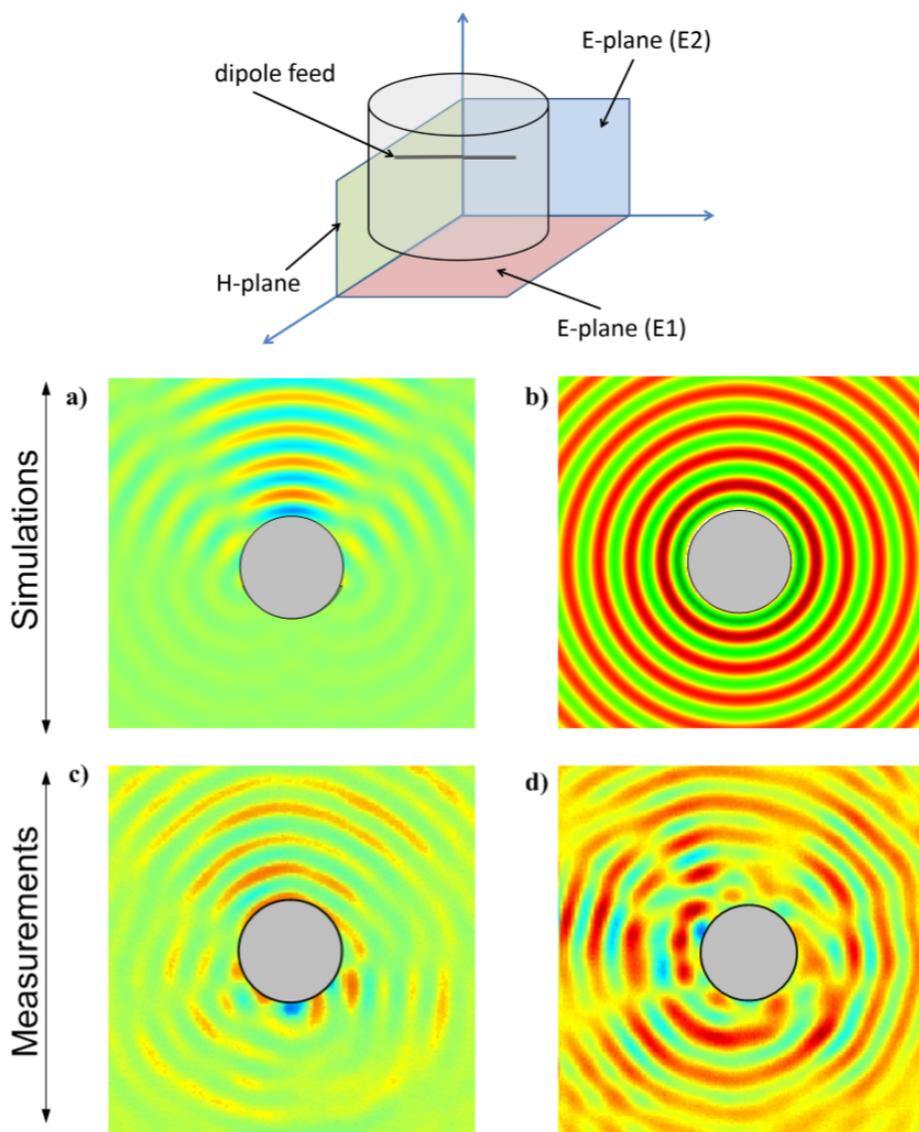


FIGURE 3.3.4: Cartographie du champ électrique de la source et du dispositif à métamatériaux.

Compte tenu des contraintes géométriques, nous avons choisi une cellule rectangulaire avec des dimensions $L_r = 5$ mm, à l'exception de la première zone où $L_r = 20/3$ mm. Pour la valeur de L_θ , nous avons choisi $L_\theta = \frac{\pi}{NL_r} (R_n^2 - R_{n-1}^2)$ où N représente le nombre de motifs dans la $n^{ième}$ zone et R_n , le rayon de la $n^{ième}$ zone. Comme on peut l'observer, ϵ_{rr} prend des valeurs proches de zéro, une conséquence du facteur d'expansion $q = -50$ afin de réaliser l'émission isotrope dans le plan xOy . L'adaptation d'impédance est assurée dans l'implémentation proposée et la fréquence de fonctionnement est fixée à 10 GHz.

3.3.1.3 Performances

Fig. 3.3.4(a) présente le résultat numérique de E_z émanant du dipôle, et lorsque le dipôle est entouré avec les métamatériaux, un rayonnement omnidirectionnel est obtenu comme sur la Fig. 3.3.4(b). Cette émission isotrope est obtenue dans le plan xOy grâce à la transformation optique. Elle est combinée avec le rayonnement isotrope du dipôle dans le plan xOz . Leurs vérifications expérimentales sont unanimement démontrées dans la Fig. 3.3.4(c) et (d). Ces résultats ont révélé pour la première fois qu'un rayonnement directif peut se métamorphoser en un isotrope par les métamatériaux proposés.

3.3.2 Réduction de la taille physique et création d'une émission directive

3.3.2.1 Méthodologie de conception

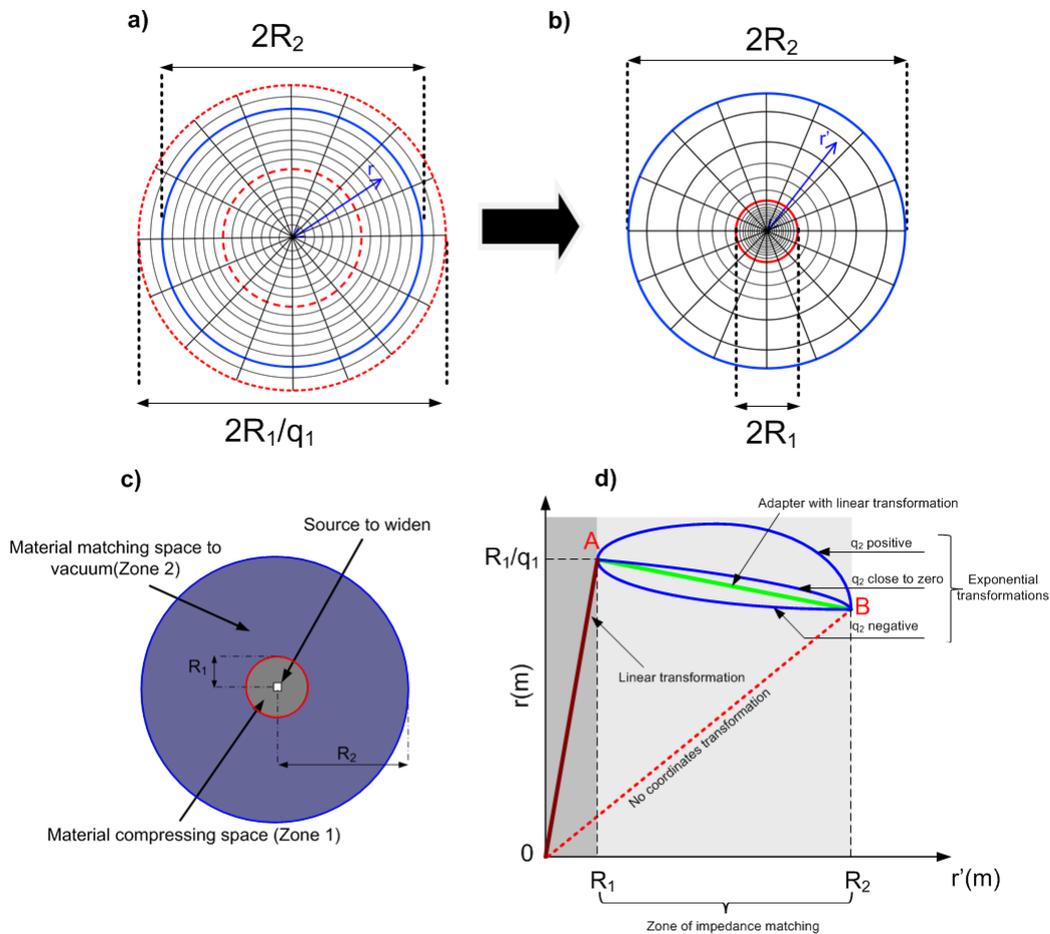


FIGURE 3.3.5: Schéma de principe de la transformation d'une source isotrope en une émission directive.

Ici, contrairement à l'agrandissement de la taille physique, nous appliquons des transformations qui compriment l'espace et, qui ensuite l'adaptent au milieu environnant. Notre approche efficace permet de réaliser une émission d'une grande ouverture, c'est à dire une émission directive, à partir d'une petite ouverture, donc d'une émission isotrope [Tichit 13a]. Nous décrivons la transformation de l'espace métrique et le calcul des paramètres du matériau. Des simulations sont effectuées afin de valider l'approche proposée sur les différentes formes de compression de l'espace, de facteurs et d'adaptation d'impédance.

Pour réaliser la transformation d'une source de petite ouverture en une beaucoup plus grande, nous discrétisons l'espace autour de l'élément rayonnant en deux zones différentes ; une première zone qui fera que la source apparaisse virtuellement plus grande que sa taille physique réelle et une deuxième zone qui assure l'adaptation d'impédance avec l'espace libre. Le principe de fonctionnement est illustré sur la Fig. 3.3.5(a). La technique consiste à comprimer une zone circulaire de l'espace de rayon R_1/q_1 (avec $q_1 < 1$), délimitée par un cercle rouge dans la Fig. 3.3.5(a) dans une région de rayon R_1 . Dans la transformation étudiée, notre espace est décrite par les coordonnées polaires et la partie angulaire de ces coordonnées reste inchangée.

La deuxième partie de la transformation consiste en une adaptation d'impédance avec l'espace environnant par une zone d'étirement annulaire définie entre les régions circulaires de rayon R_1 et R_2 , comme illustré sur la Fig. 3.3.5(b). Cet étirement de l'espace peut être effectué à l'aide de trois différentes transformations : une transformation exponentielle positive, une transformation exponentielle négative et une linéaire. L'indice i définit la zone concernée ; $i = 1$ correspond à la première zone et $i = 2$, à la deuxième zone. L'espace virtuel final décrivant le dispositif est représenté sur la Fig. 3.3.5(c). Fig. 3.3.5(d) résume les différentes transformations considérées. Afin d'assurer l'adaptation d'impédance et de métrique, la continuité de nos transformations est assurée à la limite de la première région (point A sur la Fig. 3.3.5(d) et sur la limite extérieure du dispositif (point B sur la Fig. 3.3.5(d)).

Mathématiquement, cette transformation est écrite sous la forme :

$$\begin{cases} r' = f_i(r, \theta) \\ \theta' = \theta \\ z' = z \end{cases} \quad (3.3.4)$$

La matrice Jacobienne pour les tenseurs de permittivité et de perméabilité est donnée par :

$$\overline{\mathcal{J}}_i = \begin{pmatrix} f_{i,r} & \frac{f_{i,\theta}}{r} & 0 \\ 0 & \frac{r'}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3.5)$$

Les paramètres matériau obtenus de l'Eq. 3.3.4 sont :

$$\overline{\psi}_i = \begin{pmatrix} (\psi_{rr})_i & (\psi_{r\theta})_i & 0 \\ 0 & (\psi_{\theta\theta})_i & 0 \\ 0 & 0 & (\psi_{zz})_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{rf_{i,r}}{r'} + \frac{f_{i,\theta}^2}{rr'f_{i,r}} & \frac{f_{i,\theta}}{rf_{i,r}} & 0 \\ 0 & \frac{r'f_{i,r}}{r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{r'f_{i,r}} \end{pmatrix} \quad (3.3.6)$$

Ces paramètres sont assez simples pour la transformation dans la première zone puisqu'on se retrouve avec des valeurs constantes.

La partie angulaire dans la transformation de coordonnées décrite ci-dessus permet d'obtenir des paramètres plus généraux et réglables pour une éventuelle réalisation physique du dispositif. Toutefois, dans la présente étude, nous considérons $f_{i,\theta} = 0$ pour simplifier les calculs. Pour appliquer notre transformation de coordonnées, nous considérons une compression radiale de l'espace dans la région 1. Cela conduit à un matériau avec des tenseurs de permittivité et de perméabilité élevées. Pour la transformation, nous choisissons $r' = f_1(r) = q_1(r)$ avec q_1 étant un coefficient inférieur à 1. La signification physique du facteur q_1 est le facteur de compression appliqué à la région centrale. Ce facteur a une valeur de transition qui peut être définie comme $q_0 = R_1/R_2$ où le matériau de la zone d'adaptation (région 2) passe d'un matériau à indice de réfraction positif à celui avec un indice négatif. En effet lorsque $q_1 < q_0$ le matériau présente un indice négatif et la taille apparente de la source peut être supérieure à $2R_2$. Maintenant si cette source incorporée a une petite ouverture, beaucoup plus petite que la longueur d'onde, après la transformation cette antenne se comportera comme une avec une grande ouverture, généralement q_1 fois plus grande et potentiellement beaucoup plus grande que la longueur d'onde. Une antenne de petite ouverture est bien connue pour rayonner de façon isotrope. La même antenne intégrée dans le matériau défini par la transformation présentera un rayonnement directif et donc apparait électriquement comme si sa taille est supérieure à la longueur d'onde de travail. En outre, nous pouvons obtenir le rayonnement d'un réseau classique d'antennes en utilisant un réseau de plus petites antennes incorporé dans la zone 1.

Pour assurer une bonne adaptation d'impédance pour les champs rayonnés, une zone correspondante (région 2) est ajoutée autour de la région 1. Pour concevoir cette zone, nous considérons trois différentes transformations possibles qui correspondent à l'espace entre R_1 et R_2 . La première transformation étudiée pour cette région correspondante est une forme linéaire qui prend la forme $r' = f_2(r) = \frac{1}{\alpha}(r + R_2(\alpha - 1))$, alors que les deux autres transformations ont des formes logarithmiques qui peuvent être exprimées comme $r' = f_2(r) = \frac{1}{q_2} \ln\left(\frac{r-d}{p}\right)$ où $d = R_2 - p \exp(q_2 R_2)$ et $p = \frac{R_2 - q_1 R_1}{\exp(q_2 R_2) - \exp(q_1 R_1)}$ sont des valeurs constantes. Dans ces deux cas, la transformation inverse définissant r de r' présente une forme exponentielle définie par : $F_2(r') = d + p \exp(q_2 r')$.

Cette transformation exponentielle peut être caractérisée par le facteur q_2 qui indique la forme de la métrique progressive s'adaptant au vide, comme illustré dans la Fig. 3.3.5(d). Une petite valeur de q_1 indique une forte compression de l'espace dans la première région. Pour compenser cette forte compression, la transformation dans la deuxième région donne des paramètres électromagnétiques négatifs en raison de la posi-

tion relative des points A et B, comme présenté sur la Fig. 3.3.6.

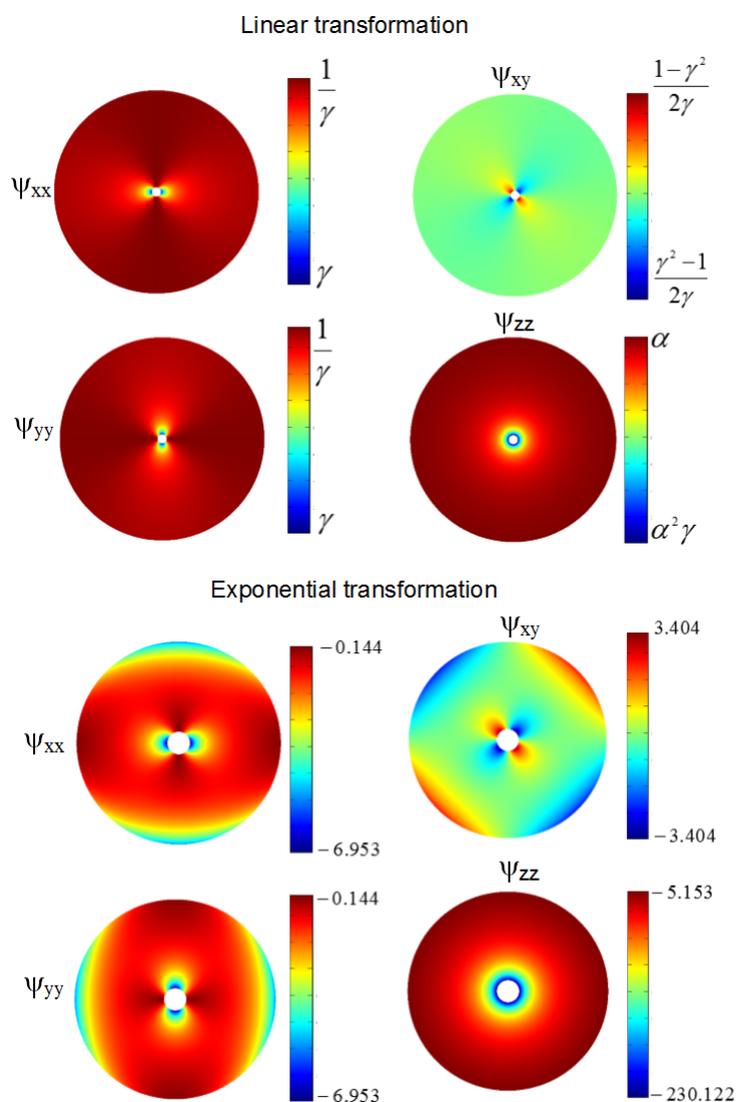


FIGURE 3.3.6: Variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité dans la zone 2 du dispositif transformant un rayonnement isotrope en directif.

La Fig. 3.3.6 montre la variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité pour la région 2. Pour la transformation linéaire, le minimum et le maximum des paramètres matériau dépendent des propriétés géométriques du problème

et ainsi ils dépendent uniquement de α et de γ , donnés par :

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1/q_1}{R_2 - R_1} \text{ et } \gamma = 1 + \frac{R_2(1 - \alpha)}{R_1\alpha} \quad (3.3.7)$$

où q_1 est défini sur $]0, 1]$. α est alors défini sur $]-\infty, 1]$ et disparaît à $q_1 = q_0$. Donc, γ est fonction de α et est supérieur à 1 pour $q_1 > q_0$ et est négatif pour $q_1 < q_0$.

3.3.2.2 Simulations et performances

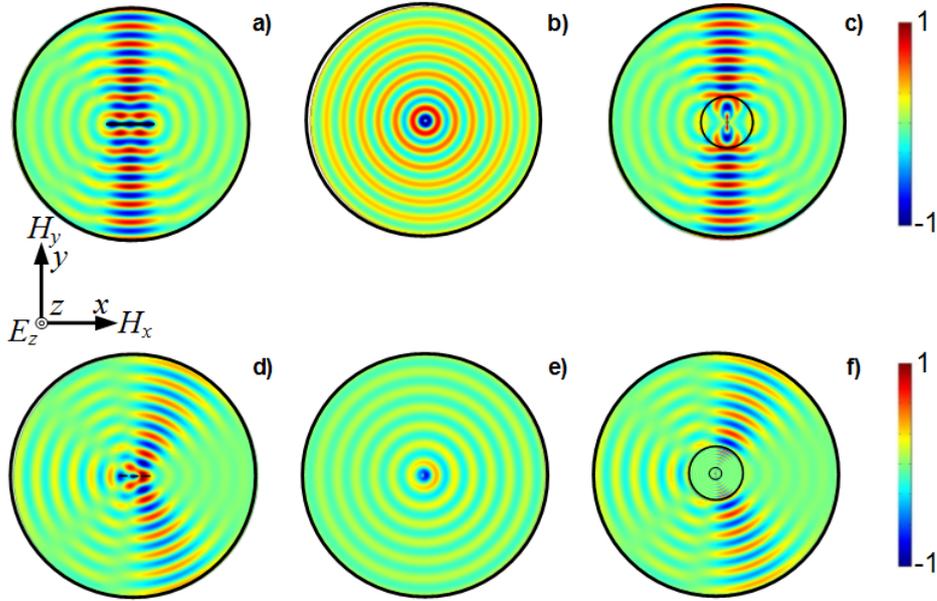


FIGURE 3.3.7: Performances du dispositif qui transforme un rayonnement isotrope en directif.

À titre d'exemple, nous montrons des simulations numériques effectuées à 10 GHz pour une transformation linéaire dans chacune des zones afin de valider le fonctionnement du dispositif. Pour vérifier notre conception, nous fixons $R_1 = 2$ mm et $R_2 = 45$ mm. Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig. 3.3.7. La Fig. 3.3.7(a) montre la distribution du champ électrique d'une source rayonnant dans l'espace libre. La source est censée avoir une largeur $d = 80$ mm ($2,7\lambda$ à 10 GHz). Pour une telle grande taille, le rayonnement est équivalent à celui d'un réseau de plusieurs éléments et par conséquent, le rayonnement est directif. La Fig. 3.3.7(b) montre une source similaire mais avec une taille beaucoup plus petite $d = 2$ mm ($\lambda/15$ à 10 GHz) qui rayonne de façon isotrope en espace libre. Par contre, quand cette petite source est entourée par un métamatériau comportant une compression facteur $q_1 = 1/40$, un diagramme de rayonnement semblable à la source de la grande ouverture est observé (3.3.7(c)). Ceci démontre qu'une antenne de petite ouverture insérée dans le métamatériau proposé présente le même comportement élec-

tromagnétique que les antennes d'ouverture beaucoup plus grandes en l'espace libre. En l'absence de la région d'adaptation (région 2), il y a une désadaptation d'impédance à la limite de la région 1 et toute l'énergie émise par la source est réfléchi et confinée dans cette région provoquant l'apparition d'ondes stationnaires dans la structure.

De plus, nous montrons que notre transformation est aussi valable pour un réseau d'antennes. Nous avons considéré un réseau de trois sources de longueur $L = 12,5$ mm, espacé d'une distance $a = 5$ mm et avec un déphasage de 30° entre chaque élément. Ces sources rayonnent dans le vide et comme illustré sur la Fig. 3.3.7(d), nous observons un faisceau dépointé en raison du déphasage appliqué entre les différents éléments du réseau. Lorsque les dimensions de ces antennes sont réduites d'un facteur 25 ($q_1 = 1/25$), les dimensions du réseau deviennent plus petites par rapport à la longueur d'onde et le champ rayonné devient isotrope comme indiqué en Fig. 3.3.7(e). En insérant les petites sources dans le métamatériau, nous sommes en mesure de rétablir le faisceau dépointé du réseau de grandes dimensions (Fig. 3.3.7(f)). Ce dernier exemple confirme la capacité de notre transformation pour modifier l'apparence électromagnétique d'éléments rayonnants.

3.3.3 Rayonnement multi-faisceaux en spiral

3.3.3.1 Méthodologie de conception

Ici, pour pousser l'idée précédente un peu plus loin, nous proposons de transformer un rayonnement isotrope en plusieurs faisceaux qui s'émanent en forme de spiral [Tichit 13b]. Ce dispositif peut être vu comme une onde électromagnétique avec un moment angulaire orbital. Ce type d'onde possède une phase qui varie avec l'angle d'azimut. Cette propriété de vorticité, permettra en principe, de transmettre sur un nombre infini de canaux à une fréquence unique, ce qui pourra certainement être une solution intéressante afin de palier au problème de congestion de bandes [Thid  07, Tamburini 12].

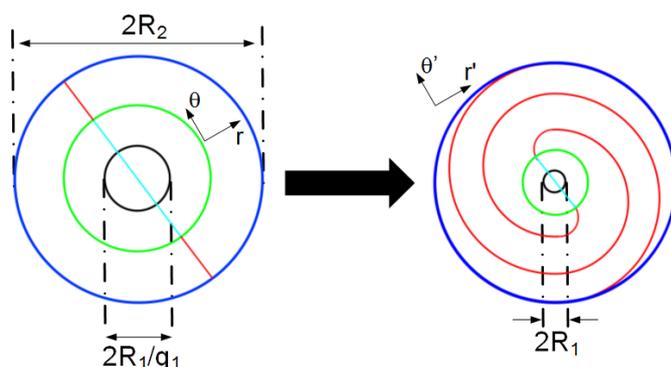


FIGURE 3.3.8: Schéma de principe de la transformation d'une source isotrope en un vortex.

Par rapport au dispositif précédent, ici la deuxième zone sert non seulement à l'adap-

tation d'impédance mais aussi à transformer la partie angulaire en fonction de la partie radiale afin d'avoir les trajets en spirale. Le schéma de principe est donné sur la Fig. 3.3.8 et comme précédemment nous considérons qu'une transformation radiale dans la zone 1. La transformation est donc écrite comme :

$$\begin{cases} r' = f_i(r) \\ \theta' = g_i(r, \theta) \\ z' = z \end{cases} \quad (3.3.8)$$

La matrice Jacobienne pour les tenseurs de permittivité et de perméabilité est donnée par :

$$\bar{J}_i = \begin{pmatrix} f_{i,r} & 0 & 0 \\ r' g_{i,r} & \frac{r'}{r} g_{i,\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3.9)$$

Les paramètres matériau obtenus de l'Eq. 3.3.4 sont :

$$\bar{\psi}_i = \begin{pmatrix} (\psi_{rr})_i & (\psi_{r\theta})_i & 0 \\ 0 & (\psi_{\theta\theta})_i & 0 \\ 0 & 0 & (\psi_{zz})_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r f_{i,r}}{r' g_{i,\theta}} & \frac{r g_{i,r}}{g_{i,\theta}} & 0 \\ 0 & \frac{r r' g_{i,r}^2 + \frac{r'}{r} g_{i,\theta}^2}{g_{i,\theta} f_{i,r}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{r' g_{i,\theta} f_{i,r}} \end{pmatrix} \quad (3.3.10)$$

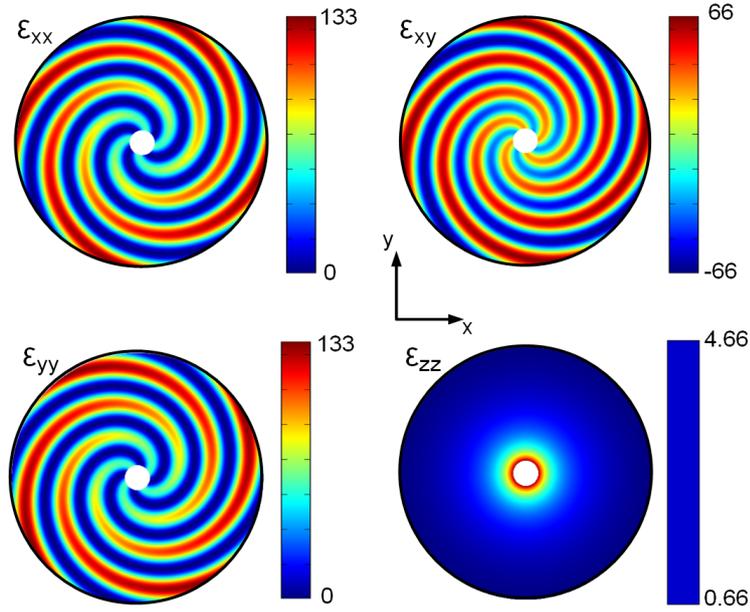


FIGURE 3.3.9: Variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité dans la zone 2 du vortex.

Pour la zone 2, nous appliquons une transformation sur la partie radiale et angulaire. La transformation sur la partie radiale est toujours linéaire et prend la forme :

$$r' = f_2(r) = \frac{q_1(R_2 - R_1)r + R_1R_2(q_1 - 1)}{q_1R_2 - R_1} \quad (3.3.11)$$

La transformation angulaire qui sert à diviser l'espace en plusieurs segments et d'appliquer un moment angulaire aux faisceaux, peut être soit de la forme linéaire :

$$\theta' = g_2(r, \theta) = \frac{\theta}{1 + N/2} + \alpha \left(\frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \right) \quad (3.3.12)$$

ou de la forme exponentielle :

$$\theta' = g_2(r, \theta) = \frac{\theta}{1 + N/2} + \alpha \left(\frac{\exp(q_2(r - R_1)) - 1}{\exp(q_2(R_2 - R_1)) - 1} \right) \quad (3.3.13)$$

Le dénominateur $1 + N/2$ de la fonction θ' doit être un entier, ce qui veut dire que N doit être 0 ou prendre des valeurs paires. Par exemple quand $N = 0$, il n'y a pas de création de multi-faisceau car il n'y a pas de segmentation de l'espace. Par contre comme on l'a montré dans la section précédente, la compression de l'espace dans la zone 1 sert déjà à convertir un rayonnement isotrope en deux faisceaux directs. Donc si effectivement on veut avoir que deux faisceaux, il doit y avoir une compression dans la zone 1, c'est à dire $q_1 < 1$, et N doit être égale à 0.

Par contre, si nous voulons plus que deux faisceaux en sortie, il faut $N \neq 0$ et qu'il n'y ait pas de la compression d'espace dans la zone 1. La Fig. 3.3.9 montre la variation des différentes composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité dans la zone 2 pour une transformation linéaire radiale suivie d'une transformation exponentielle angulaire. Les paramètres utilisés sont : $q_1 = 1$ (pas de compression d'espace dans la zone 1), $q_2 = -30$, $R_1 = 5$ mm, $R_2 = 50$ mm, $N = 2$ et $\alpha = 300^\circ$.

3.3.3.2 Simulations et performances

La Fig. 3.3.10 montre la cartographie du champ électrique pour plusieurs valeurs de N . Nous voyons que le paramètre N définit le nombre de faisceaux et dans chaque cas, nous pouvons observer le trajet en spirale des faisceaux avant d'être émis dans l'espace libre.

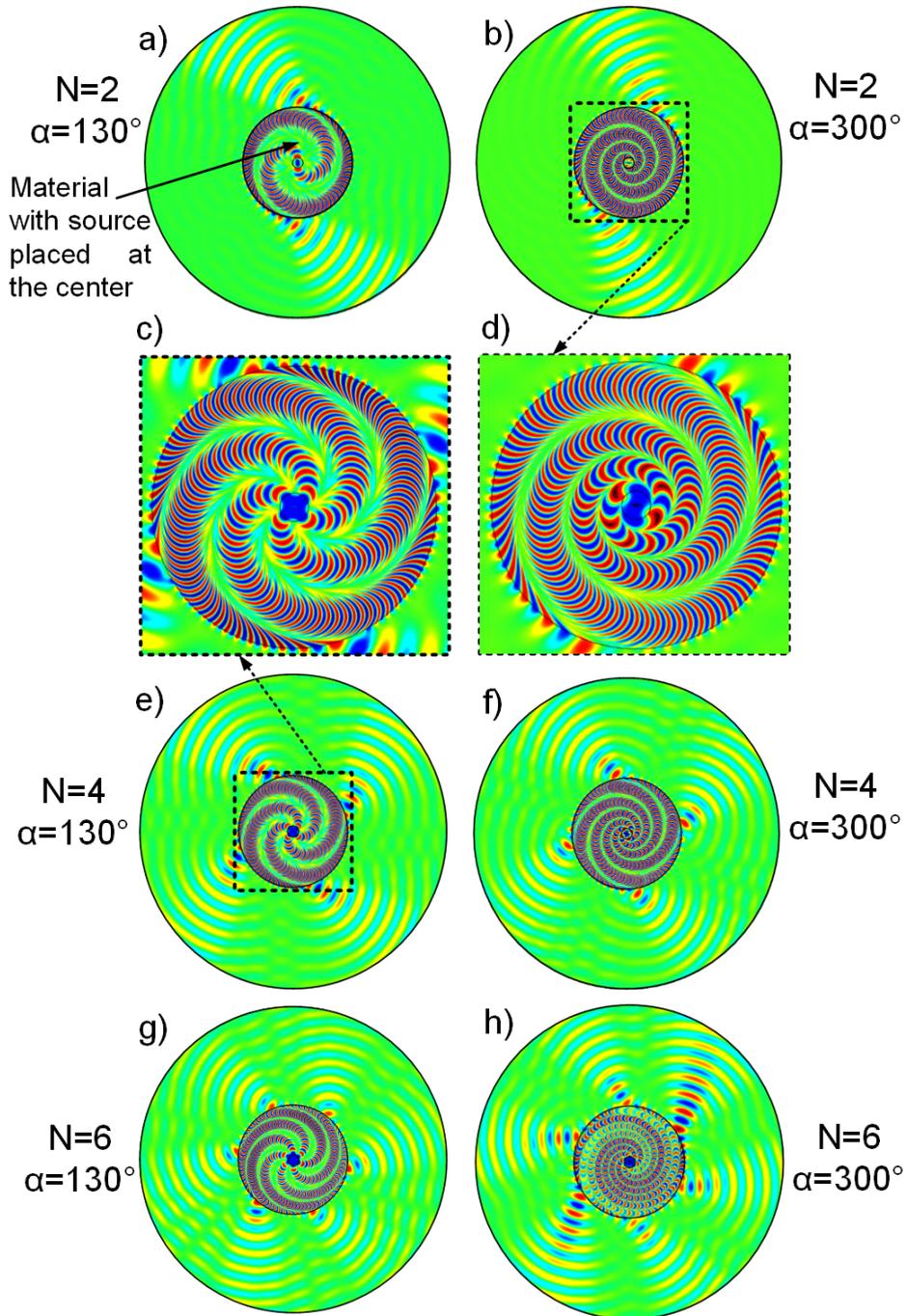


FIGURE 3.3.10: Performances du vortex.

3.4 Conception d'une transition de guide d'ondes

Cette section est dédiée à la conception d'une transition entre deux guides d'ondes de sections différentes.

3.4.1 Principe de fonctionnement

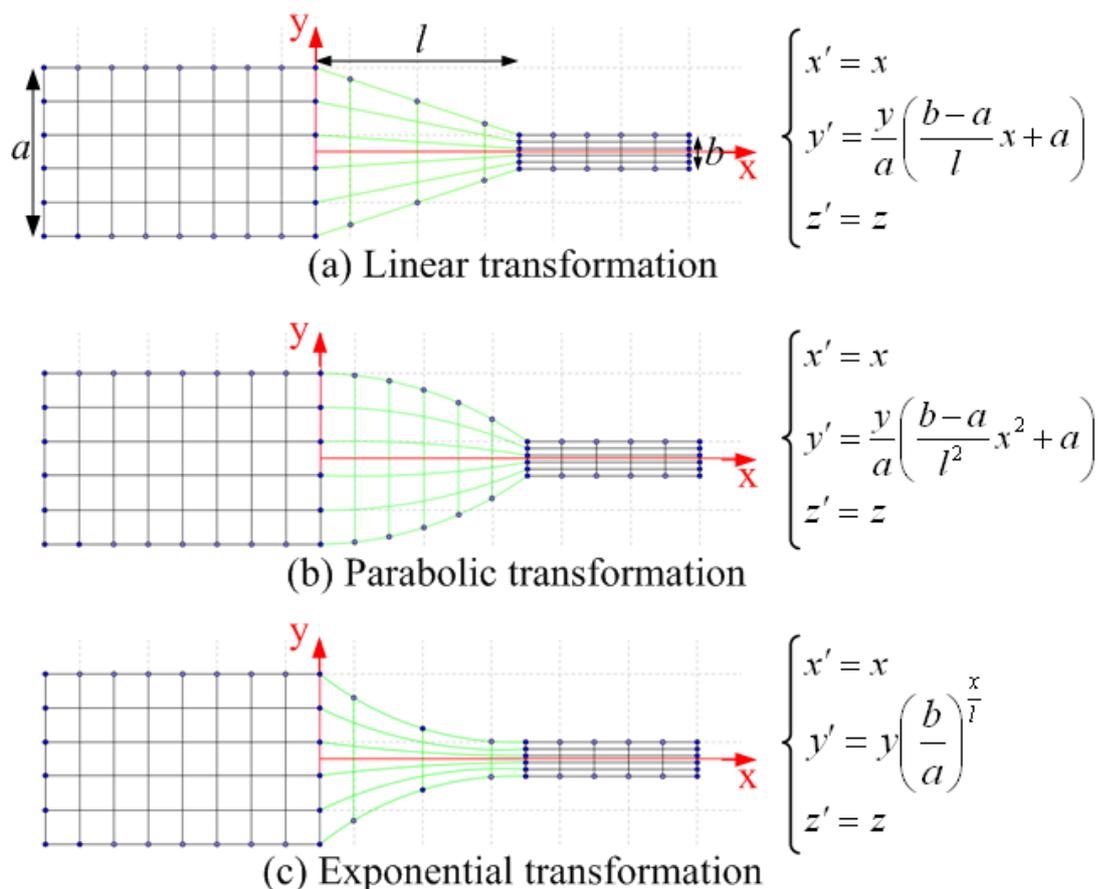


FIGURE 3.4.1: Schéma de principe de l'adaptateur de guide d'ondes.

Trois transformations différentes sont proposées ci-dessous pour obtenir un adaptateur à faible réflexion entre deux guides d'ondes de différentes sections [Tichit 10]. Chaque guide d'ondes est représenté par des lignes noires dans son espace respectif donné en coordonnées cartésiennes comme représenté sur la Fig. 3.4.1. L'objectif est de relier chaque ligne horizontale de chaque espace pour faciliter la transmission des ondes électromagnétiques entre les deux espaces. Pour la première formulation, nous supposons une transformation linéaire en reliant les deux espaces avec des lignes droites comme dans la Fig. 3.4.1(a). La seconde formulation utilise une transformation parabolique pour réa-

liser la connexion (Fig. 3.4.1(b)). Pour la troisième, une transformation exponentielle est définie comme le montre la Fig. 3.4.1(c). Dans les trois cas, les propriétés géométriques du schéma demeurent inchangées. La largeur des guides d'entrée et de sortie est respectivement notée a et b , et la longueur de l'adaptateur dans les trois cas est notée l . Les expressions mathématiques définissant chaque formulation sont données dans la Fig. 3.4.1. Comme nous pouvons le constater à partir des expressions mathématiques, les différentes formulations dépendent des paramètres géométriques a , b et l .

Les paramètres matériau sont :

$$\psi^{ij} = \begin{pmatrix} \psi_{xx}(x') & \psi_{xy}(x', y') & 0 \\ \psi_{xy}(x', y') & \psi_{yy}(x', y') & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{zz}(x') \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

Tab. 3.1 donne la valeur des différentes composantes des tenseurs :

Transformation	$\phi_{xx}(x') = \phi_{zz}(x')$	$\phi_{xy}(x', y')$	$\phi_{yy}(x', y')$
Linéaire	$\frac{al}{a(l-x') + bx'}$	$\theta_{xx}^2 \frac{b-a}{al} y'$	$\frac{1}{\theta_{xx}} + \frac{\theta_{xy}^2}{\theta_{xx}}$
Parabolique	$\frac{al^2}{(al^2 - ax'^2 + bx'^2)}$	$\frac{2\theta_{xx}^2 (b-a)x'y'}{al^2}$	$\frac{1}{\theta_{xx}} + \frac{\theta_{xy}^2}{\theta_{xx}}$
Exponentielle	$\left(\frac{b}{a}\right)^{-\frac{x'}{l}}$	$\frac{\theta_{xx} y' \ln \frac{b}{a}}{l}$	$\frac{1}{\theta_{xx}} + \frac{\theta_{xy}^2}{\theta_{xx}}$

TABLE 3.1: Composantes des tenseurs du matériau calculé.

Nous supposons un champ électrique dirigé suivant l'axe z . Les largeurs de guides d'ondes sont 10 cm et 2 cm, avec des fréquences de coupure respectivement de 1,5 GHz et 7,5 GHz. La longueur de l'adaptateur est $l = 5$ cm, suffisant pour permettre de générer la dépendance spatiale des paramètres $\phi_{xx}(x')$, $\phi_{zz}(x')$, $\phi_{xy}(x', y')$ et $\phi_{yy}(x', y')$ comme présenté sur la Fig. 3.4.2. Ces distributions sont tracées suivant les expressions données dans le Tab. 3.1. Même si la distribution spatiale est quasi similaire dans les trois cas, les valeurs des paramètres sont complètement différentes. Pour les transformations linéaire et parabolique, les valeurs de ϕ_{yy} sont trop importantes pour être physiquement réalisables. La conception de cette transition à métamatériaux sera facilitée par une variation graduelle des paramètres géométriques des structures résonantes composant le métamatériau. Donc, la transformation exponentielle semble être la mieux adaptée pour une réalisation de prototype.

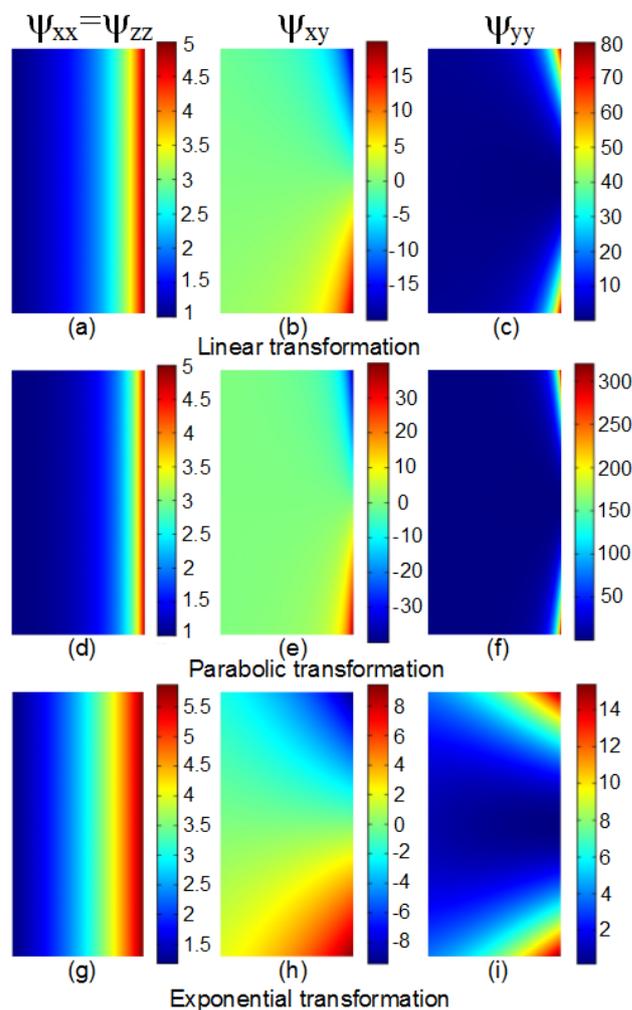


FIGURE 3.4.2: Composantes des tenseurs de permittivité et de perméabilité de l'adaptateur.

3.4.2 Performances de la transition

Les simulations sont effectuées en bidimensionnel pour la validation des paramètres du matériau proposé. La Fig. 3.4.3 montre la simulation des 3 configurations d'adaptateur à 10 et 30 GHz. Pour comparaison, la jonction des deux guides sans adaptateur est simulée et présentée sur les Figs. 3.4.3(a)-(c). En ce qui concerne la jonction entre les guides d'ondes sans adaptateur, nous observons des distorsions de phase provoquées par les réflexions à la jonction entre les deux guides d'ondes (Figs. 3.4.3(a)-(c)). Ces distorsions deviennent plus sévères à des fréquences plus élevées (30 GHz). Cependant, des simulations effectuées sur les jonctions avec transitions (Figs. 3.4.3(d)-(l)) montrent que

les ondes électromagnétiques sont bien guidées en passant d'un guide d'onde vers l'autre. Nous pouvons aussi remarquer qu'il n'y a aucune incidence sur le mode guidé lorsque le milieu obtenu par transformation d'espace est intégré à la jonction entre les deux guides. La différence dans les formulations de transformation provoque un changement dans la trajectoire des ondes électromagnétiques dans la section de transition.

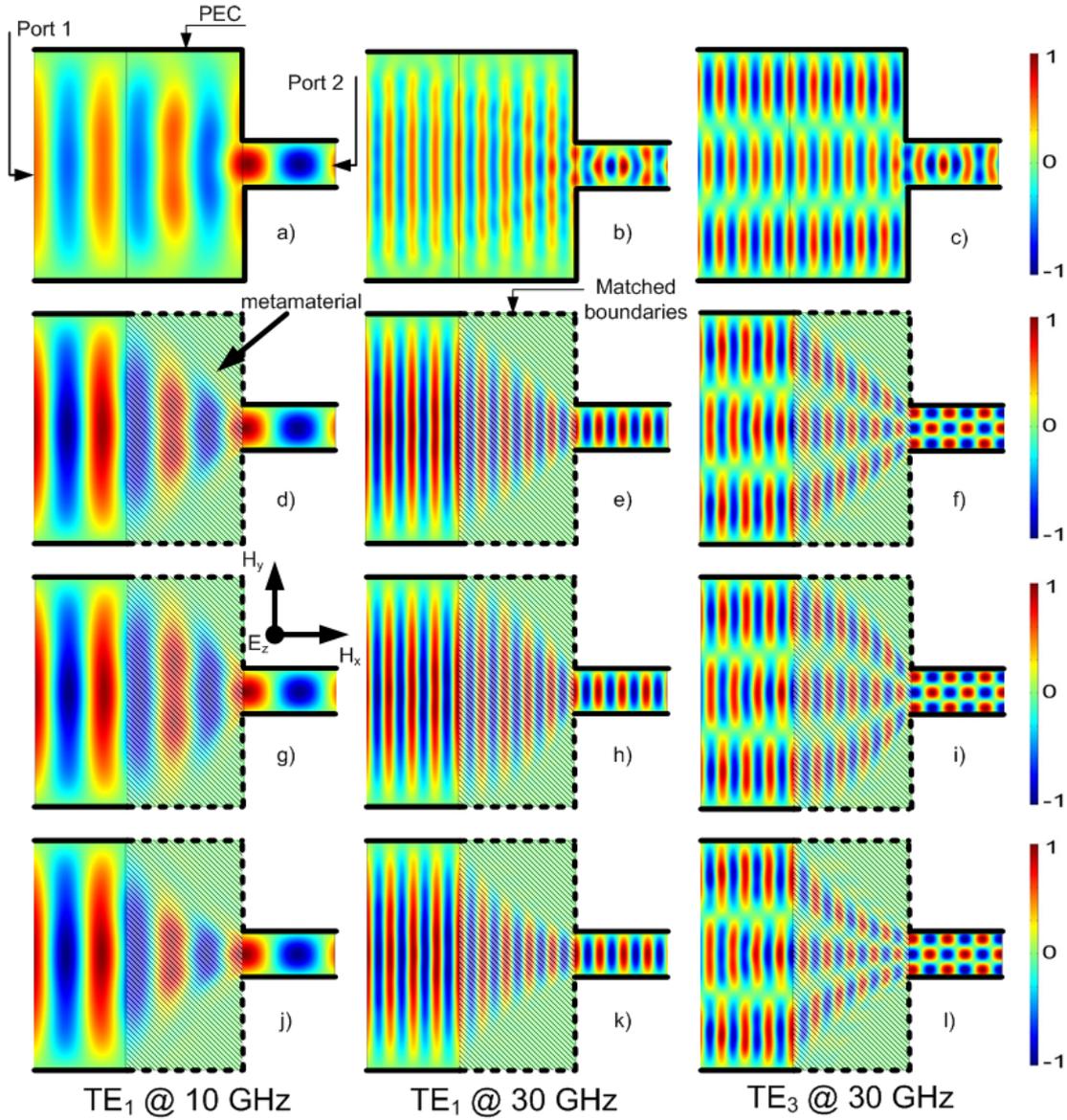


FIGURE 3.4.3: Performances de l'adaptateur de guide d'ondes. (a)-(c) Jonction sans adaptateur. (d)-(f) Adaptateur linéaire. (g)-(i) Adaptateur parabolique. (j)-(l) Adaptateur exponentiel.

L'augmentation de la fréquence permet d'améliorer la transmission entre les deux guides d'ondes à travers la transition. Ce phénomène peut être observé lorsque nous comparons les distributions de champ électrique à 10 GHz et 30 GHz. À 10 GHz, une partie du champ électromagnétique situé sur la frontière des fronts d'onde n'est pas transféré dans le second guide, à cause de la diffraction. Ce phénomène diminue quand nous augmentons la fréquence grâce à l'approximation géométrique, pour laquelle la transformation devient plus précise. La Fig. 3.4.3 montre l'efficacité des paramètres du matériau défini par la technologie de transformation de coordonnées spatiales.

Pour annuler toutes les réflexions et avoir une transmission totale, il est possible, par exemple, de créer un gradient d'indice isotrope dans le deuxième guide. Ce gradient peut être créé en choisissant une transformation conforme, avec une transformation sur le composant x . La Fig. 3.4.4(a) montre l'évolution du coefficient de transmission suivant l'indice dans le petit guide d'ondes. Les Figs. 3.4.4(a) et (b) montrent les ondes stationnaires dans l'adaptateur proposé et le grand guide d'onde dues aux réflexions à l'entrée du petit guide d'ondes. Ainsi, pour assurer une transmission quasi-totale un matériau avec un gradient d'indice est introduit suivant l'axe des x , comme celui présenté sur la Fig. 3.4.4(c). Toute l'énergie est ensuite transférée au petit guide.

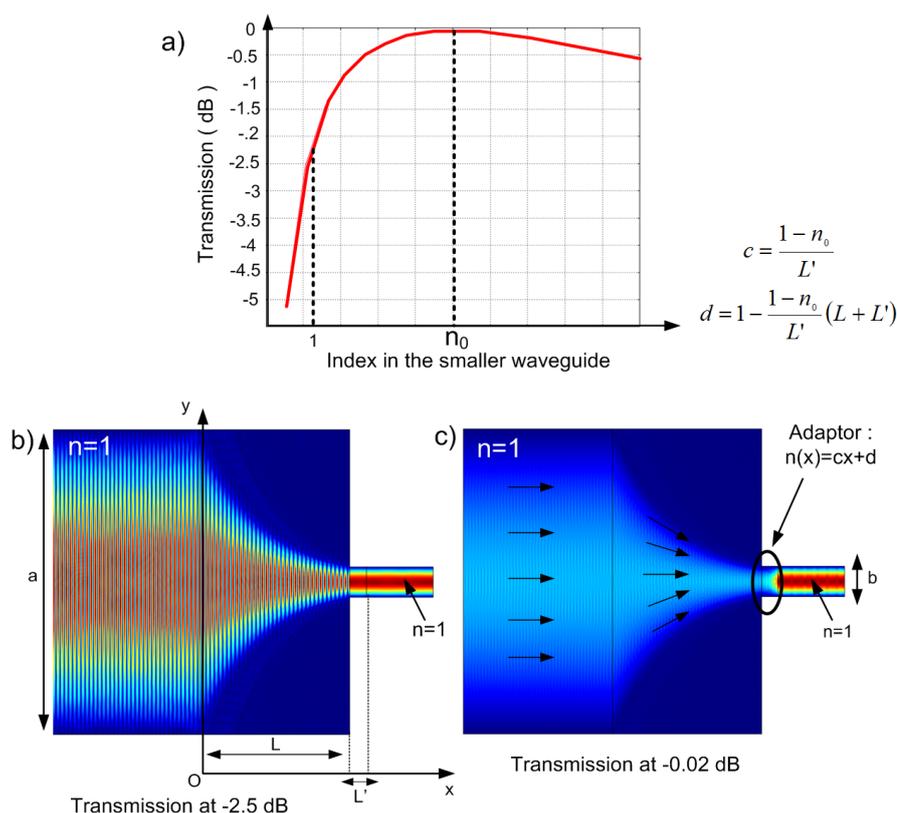


FIGURE 3.4.4: Évolution de la transmission suivant l'indice dans le petit guide.

3.5 Conclusion et perspectives

Les travaux rapportés dans ce chapitre concernent le développement d'antennes et de dispositifs micro-ondes via l'utilisation de la transformation optique. Cette technique permet de contrôler le trajet d'une onde par le biais d'un nouvel espace possédant des paramètres électromagnétiques bien spécifiques. Les métamatériaux sont donc nécessaires pour matérialiser cet espace. Au sein de l'équipe CRIME à l'IEF, des travaux dans le domaine de la transformation optique ont été faits dans le cadre de la thèse de P.-H. Tichit et sont toujours en cours de le cadre de ses travaux post-doctoraux ainsi que dans la thèse de J. Yi. Nous sommes une équipe très active sur le plan national sur cette thématique, surtout dans le domaine des antennes. Et, pour se démarquer des autres équipes internationales, nous essayons dans la mesure du possible de valider expérimentalement nos propositions théoriques.

Dans ce chapitre, j'ai donc récapitulé nos différentes propositions et conceptions dans ce domaine plein d'intérêt. J'ai commencé par présenter deux antennes directives obtenues par la transformation d'onde cylindrique en une onde plane. Dans les deux cas, nous avons donc obtenu une émission directive à partir d'une antenne patch avec un rayonnement omnidirectionnel. De plus, dans la deuxième antenne, le faisceau directif a été dépointé à la quasi-horizontale.

Ensuite, j'ai présenté trois dispositifs capables de changer l'apparence physique d'une source rayonnante. Le premier dispositif permet de transformer un rayonnement directif en un rayonnement isotrope. Il permet, avec des dimensions raisonnables et non pas très petites (surtout à très haute fréquence), d'avoir un rayonnement omnidirectionnel. Le deuxième dispositif a un fonctionnement inverse, c'est à dire que même après avoir miniaturisé des sources rayonnantes, nous sommes capables de rétablir leur rayonnement d'origine. Ce concept a été validé pour aussi bien une source rayonnante qu'un réseau de plusieurs sources déphasées où le faisceau est dépointé. Le troisième dispositif permet de transformer une émission isotrope en plusieurs faisceaux directif en spiral. Une validation expérimentale est prévue pour ce dispositif qui peut être appliqué pour transmettre plusieurs canaux à une seule fréquence et éviter la saturation des bandes de fréquences.

En dernier, nous avons présenté un adaptateur de guide d'ondes permettant de relier deux guides de sections différentes sans aucune réflexion. Ce dispositif est en cours d'étude dans le domaine de l'infrarouge [Ghasemi 10b] au sein de notre équipe où une validation expérimentale est prévue.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux de thèse et de post-doc de P.-H. Tichit que j'ai co-encadré. Ces travaux ont fait l'objet de deux chapitres d'ouvrage [de Lustrac 12, de Lustrac 14] et de nombreuses publications dans des revues et des conférences. Par conséquent, je remercie très sincèrement P.-H. Tichit pour les travaux effectués.

D'autres travaux dans le domaine de la transformation optique sont en cours dans le cadre de la thèse de J. Yi. A titre d'exemple, nous sommes en train de concevoir une antenne miniature à 125 MHz. Nous avons aussi commencé une collaboration avec le National University of Singapore (NUS) sur cette thématique.

Bibliographie

- [Allen 09] J. Allen, N. Kundtz, D.A. Roberts, S.A. Cummer & D.R. Smith. *Electromagnetic source transformations using superellipse equations*. Applied Physics Letters, vol. 94, no. 19, page 194101, 2009.
- [Bergamin 08] L. Bergamin. *Generalized transformation optics from triple space-time metamaterials*. Physical Review A, vol. 78, no. 4, page 43825, 2008.
- [Cai 07a] W. Cai, U.K. Chettiar, A.V. Kildishev & V.M. Shalaev. *Optical cloaking with metamaterials*. Nature Photonics, vol. 1, no. 4, pages 224–227, 2007.
- [Chang 10] Z. Chang, X. Zhou, J. Hu & G. Hu. *Design method for quasi-isotropic transformation materials based on inverse Laplace's equation with sliding boundaries*. Optics Express, vol. 18, no. 6, pages 6089–6096, 2010.
- [Chen 07a] H. Chen & C.T. Chan. *Transformation media that rotate electromagnetic fields*. Applied Physics Letters, vol. 90, page 241105, 2007.
- [Chen 09b] H. Chen, B. Hou, S. Chen, X. Ao, W. Wen & C.T. Chan. *Design and experimental realization of a broadband transformation media field rotator at microwave frequencies*. Physical Review Letters, vol. 102, no. 18, page 183903, 2009.
- [Cheng 10] Q. Cheng, T.J. Cui, W.X. Jiang & B.G. Cai. *An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials*. New Journal of Physics, vol. 12, no. 6, page 063006, 2010.
- [Crudo 09] R.A. Crudo & J.G. O'Brien. *Metric approach to transformation optics*. Physical Review A, vol. 80, page 33824, 2009.
- [de Lustrac 12] A. de Lustrac, S.N. Burokur, P.-H. Tichit, B. Kanté, R. Ghasemi & D. Germain. *Metamaterial, chapitre Space coordinate transformation and applications*, pages 113–142. InTech, 2012.
- [de Lustrac 14] A. de Lustrac, S.N. Burokur & P.-H. Tichit. *Transformation electromagnetics and metamaterials : Fundamental principles and applications, chapitre Transformation electromagnetics and non-standard devices*, pages 459–491. Springer, 2014.
- [Ergin 10] T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner, J.B. Pendry & M. Wegener. *Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths*. Science, vol. 328, no. 5976, page 337, 2010.

-
- [Farhat 08] M. Farhat, S. Enoch, S. Guenneau & A.B. Movchan. *Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid*. Physical Review Letters, vol. 101, page 134501, 2008.
- [Gabrielli 09] L.H. Gabrielli, J. Cardenas, C.B. Poitras & M. Lipson. *Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies*. Nature Photonics, vol. 3, no. 8, pages 461–463, 2009.
- [Gaillot 08a] D.P. Gaillot, C. Croënne & D. Lippens. *An all-dielectric route for terahertz cloaking*. Optics Express, vol. 16, no. 6, pages 3986–3992, 2008.
- [Genov 09] D.A. Genov, S. Zhang & X. Zhang. *Mimicking celestial mechanics in metamaterials*. Nature Physics, vol. 5, no. 9, pages 687–692, 2009.
- [Ghasemi 10b] R. Ghasemi, P.-H. Tichit, A. Degiron, A. Lupu & A. de Lustrac. *Efficient control of a 3D optical mode using a thin sheet of transformation optical medium*. Optics Express, vol. 18, no. 19, pages 20305–20312, 2010.
- [Greenleaf 07] A. Greenleaf, Y. Kurylev, M. Lassas & G. Uhlmann. *Electromagnetic wormholes and virtual magnetic monopoles from metamaterials*. Physical Review Letters, vol. 99, no. 18, page 183901, 2007.
- [Greenleaf 08] A. Greenleaf, Y. Kurylev, M. Lassas & G. Uhlmann. *Isotropic transformation optics : approximate acoustic and quantum cloaking*. New Journal of Physics, vol. 10, page 115024, 2008.
- [Guenneau 05] S. Guenneau, B. Gralak & J.B. Pendry. *Perfect corner reflector*. Optics Letters, vol. 30, no. 10, pages 1204–1206, 2005.
- [Han 10] T. Han & C.W. Qiu. *Isotropic nonmagnetic flat cloaks degenerated from homogeneous anisotropic trapeziform cloaks*. Optics Express, vol. 18, no. 12, pages 13038–13043, 2010.
- [Huangfu 09] J. Huangfu, S. Xi, F. Kong, J. Zhang, H. Chen, D. Wang, B.-I. Wu, L. Ran & J.A. Kong. *Application of coordinate transformation in bent waveguides*. Journal of Applied Physics, vol. 104, no. 1, page 014502, 2009.
- [Jiang 08a] W.X. Jiang, T.J. Cui, Q. Cheng, J.Y. Chin, X.M. Yang, R. Liu & D.R. Smith. *Design of arbitrarily shaped concentrators based on conformally optical transformation of nonuniform rational B-spline surfaces*. Applied Physics Letters, vol. 92, no. 26, page 264101, 2008.

- [Jiang 08b] W.X. Jiang, T.J. Cui, H.F. Ma, X.Y. Zhou & Q. Cheng. *Cylindrical-to-plane-wave conversion via embedded optical transformation*. Applied Physics Letters, vol. 92, page 261903, 2008.
- [Jiang 13] W.X. Jiang, C.W. Qiu, T. Han, S. Zhang & T.J. Cui. *Creation of Ghost Illusions Using Wave Dynamics in Metamaterials*. Advanced Functional Materials, vol. 23, no. 32, pages 4028–4034, 2013.
- [Kanté 09b] B. Kanté, D. Germain & A. de Lustrac. *Experimental demonstration of a nonmagnetic metamaterial cloak at microwave frequencies*. Physical Review B, vol. 80, page 201104, 2009.
- [Kong 09] F. Kong, B.-I. Wu, J.A. Kong, J. Huangfu, S. Xi & H. Chen. *Planar focusing antenna design by using coordinate transformation technology*. Applied Physics Letters, vol. 91, no. 25, page 253509, 2009.
- [Kundtz 08] N. Kundtz, D.A. Roberts, J. Allen, S. Cummer & D.R. Smith. *Optical source transformations*. Optics Express, vol. 16, no. 26, pages 21215–21222, 2008.
- [Kundtz 10] N. Kundtz & D.R. Smith. *Extreme-angle broadband metamaterial lens*. Nature Materials, vol. 9, no. 2, pages 129–132, 2010.
- [Kwon 08] D.-H. Kwon & D.H. Werner. *Transformation optical designs for wave collimators, flat lenses and right-angle bends*. New Journal of Physics, vol. 10, page 115023, 2008.
- [Lai 09] Y. Lai, J. Ng, H.Y. Chen, D.Z. Han, J.J. Xiao, Z.Q. Zhang & C.T. Chan. *Illusion optics : the optical transformation of an object into another object*. Physical Review Letters, vol. 102, no. 25, page 253902, 2009.
- [Landy 09] N.I. Landy & W.J. Padilla. *Guiding light with conformal transformations*. Optics Express, vol. 17, no. 17, pages 14872–14879, 2009.
- [Leonhardt 00] U. Leonhardt. *Space-time geometry of quantum dielectrics*. Physical Review A, vol. 62, page 012111, 2000.
- [Leonhardt 06a] U. Leonhardt. *Optical conformal mapping*. Science, vol. 312, no. 5781, pages 1777–1780, 2006.
- [Leonhardt 08] U. Leonhardt & T. Tyc. *Superantenna made of transformation media*. New Journal of Physics, vol. 10, page 115026, 2008.
- [Li 08] J. Li & J.B. Pendry. *Hiding under the carpet : a new strategy for cloaking*. Physical Review Letters, vol. 101, no. 20, page 203901, 2008.

-
- [Liu 09] R. Liu, C. Ji, J.J. Mock, J.Y. Chin, T.J. Cui & D.R. Smith. *Broadband ground-plane cloak*. Science, vol. 323, no. 5912, pages 366–369, 2009.
- [Luo 08a] Y. Luo, H. Chen, J. Zhang, L. Ran & J.A. Kong. *Design and analytical full-wave validation of the invisibility cloaks, concentrators, and field rotators created with a general class of transformations*. Physical Review B, vol. 77, no. 12, page 125127, 2008.
- [Luo 08b] Y. Luo, J. Zhang, L. Ran, H. Chen & J.A. Kong. *Controlling the emission of electromagnetic source*. PIERS Online, vol. 4, no. 7, pages 795–800, 2008.
- [Luo 08c] Y. Luo, J. Zhang, L. Ran, H. Chen & J.A. Kong. *New concept conformal antennas utilizing metamaterial and transformation optics*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 7, pages 509–512, 2008.
- [Ma 09] Y.G. Ma, C.K. Ong, T. Tyc & U. Leonhardt. *An omnidirectional retroreflector based on the transmutation of dielectric singularities*. Nature Materials, vol. 8, no. 8, pages 639–642, 2009.
- [Ma 10] H.F. Ma & T.J. Cui. *Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens*. Nature Communications, vol. 1, page 124, 2010.
- [Narimanov 09a] E.E. Narimanov & A.V. Kildishev. *Optical black hole : Broadband omnidirectional light absorber*. Applied Physics Letters, vol. 95, no. 4, page 041106, 2009.
- [Pendry 99] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins & W.J. Stewart. *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 11, pages 2075–2084, 1999.
- [Pendry 06] J.B. Pendry, D. Schurig & D.R. Smith. *Controlling electromagnetic fields*. Science, vol. 312, no. 5781, pages 1780–1782, 2006.
- [Plebanski 60] J. Plebanski. *Electromagnetic waves in gravitational fields*. Physical Review, vol. 118, no. 5, pages 1396–1408, 1960.
- [Popa 09] B.I. Popa, J. Allen & S.A. Cummer. *Conformal array design with transformation electromagnetics*. Applied Physics Letters, vol. 94, page 244102, 2009.
- [Quevedo-Teruel 13] O. Quevedo-Teruel, W. Tang, R.C. Mitchell-Thomas, A. Dyke, H. Dyke, L. Zhang, S. Haq & Y. Hao. *Transformation optics for*

- antennas : why limit the bandwidth with metamaterials ?* Scientific Reports, vol. 3, page 1903, 2013.
- [Rahm 08a] M. Rahm, S.A. Cummer, D. Schurig, J.B. Pendry & D.R. Smith. *Optical design of reflectionless complex media by finite embedded coordinate transformations*. Physical Review Letters, vol. 100, no. 6, page 63903, 2008.
- [Rahm 08b] M. Rahm, D.A. Roberts, J.B. Pendry & D.R. Smith. *Transformation-optical design of adaptive beam bends and beam expanders*. Optics express, vol. 16, no. 15, pages 11555–11567, 2008.
- [Rahm 08c] M. Rahm, D. Schurig, D.A. Roberts, S.A. Cummer, D.R. Smith & J.B. Pendry. *Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations*. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 6, no. 1, pages 87–95, 2008.
- [Roberts 09b] D.A. Roberts, M. Rahm, J.B. Pendry & D.R. Smith. *Transformation-optical design of sharp waveguide bends and corners*. Applied Physics Letters, vol. 93, no. 25, page 251111, 2009.
- [Schmiele 10] M. Schmiele, V.S. Varma, C. Rockstuhl & F. Lederer. *Designing optical elements from isotropic materials by using transformation optics*. Physical Review A, vol. 81, no. 3, page 33837, 2010.
- [Schurig 06b] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr & D.R. Smith. *Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies*. Science, vol. 314, no. 5801, pages 977–980, 2006.
- [Schurig 06c] D. Schurig, J.J. Mock & D.R. Smith. *Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 88, page 041109, 2006.
- [Tamburini 12] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini & F. Romanato. *Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity : first experimental test*. New Journal of Physics, vol. 14, no. 3, page 033001, 2012.
- [Tamm 24] I.Y. Tamm. *Electrodynamics of an anisotropic medium in the special theory of relativity*. Russian Journal of Physical Chemistry, vol. 56, page 248, 1924.
- [Thidé 07] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T.D. Carozzi, Y.N. Istomin, N.H. Ibragimov & R. Khamitova. *Utilization of Photon Orbital Angular Momentum in the Low-Frequency Radio Domain*. Physical Review Letters, vol. 99, page 087701, 2007.

-
- [Thompson 11] R.T. Thompson, S.A. Cummer & J. Fraueiniener. *A completely covariant approach to transformation optics*. Journal of Optics, vol. 13, page 024008, 2011.
- [Tichit 09] P.-H. Tichit, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Ultradirective antenna via transformation optics*. Journal of Applied Physics, vol. 105, no. 10, page 104912, 2009.
- [Tichit 10] P.-H. Tichit, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Waveguide taper engineering using coordinate transformation technology*. Optics Express, vol. 18, no. 2, pages 767–772, 2010.
- [Tichit 11a] P.-H. Tichit, S. N. Burokur, D. Germain & A. de Lustrac. *Design and experimental demonstration of a high-directive emission with transformation optics*. Physical Review B, vol. 83, page 155108, 2011.
- [Tichit 11b] P.-H. Tichit, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Transformation media producing quasi-perfect isotropic emission*. Optics Express, vol. 19, no. 21, pages 20551–20556, 2011.
- [Tichit 12] P.-H. Tichit. *Transformations d’espaces et applications électromagnétiques dans les domaines optiques et micro-ondes*. PhD thesis, Université Paris Sud 11, 2012.
- [Tichit 13a] P.-H. Tichit, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Reducing physical appearance of electromagnetic sources*. Optics Express, vol. 21, no. 4, pages 5053–5062, 2013.
- [Tichit 13b] P.-H. Tichit, S.N. Burokur & A. de Lustrac. *Spiral-like multi-beam emission via transformation electromagnetics*. Journal of Applied Physics, submitted, october 2013.
- [Tichit 13c] P.-H. Tichit, S.N. Burokur, C.-W. Qiu & A. de Lustrac. *Experimental verification of isotropic radiation from a coherent dipole source via electric-field-driven LC resonator metamaterials*. Physical Review Letters, vol. 111, page 133901, 2013.
- [Turpin 10] J.P. Turpin, A.T. Massoud, Z.H. Jiang, P.L. Werner & D.H. Werner. *Conformal mappings to achieve simple material parameters for transformation optics devices*. Optics Express, vol. 18, no. 1, pages 244–252, 2010.
- [Valentine 09] J. Valentine, J. Li, T. Zentgraf, G. Bartal & X. Zhang. *An optical cloak made of dielectrics*. Nature Materials, vol. 8, no. 7, pages 568–571, 2009.

- [Wu 12] X. Wu, P.-H. Tichit, S.N. Burokur, S. Kirouane, A. Sellier & A. de Lustrac. *Numerical and experimental demonstration of a coordinate transformation-based azimuthal directive emission*. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 54, no. 11, pages 2536–2540, 2012.
- [Yan 08] W. Yan, M. Yan, Z. Ruan & M. Qiu. *Coordinate transformations make perfect invisibility cloaks with arbitrary shape*. New Journal of Physics, vol. 10, page 043040, 2008.
- [Zhang 09] J. Zhang, Y. Luo, H. Chen, J. Huangfu, B.-I. Wu, L. Ran & J.A. Kong. *Guiding waves through an invisible tunnel*. Optics Express, vol. 17, no. 8, pages 6203–6208, 2009.

Chapitre 4

Antennes lentilles à gradient d'indice

4.1	Introduction	135
4.1.1	État de l'art et contexte	136
4.1.2	Objectifs et contributions	137
4.2	Conception de métamatériaux non-résonants planaires	137
4.3	Conception d'antennes lentilles large bande à gradient d'indice	141
4.3.1	Antenne lentille Lüneburg	143
4.3.2	Antenne lentille « Half Maxwell Fish-Eye »	147
4.4	Conclusion et perspectives	149
	Bibliographie	150

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les travaux effectués sur les métamatériaux à gradient d'indice dans le cadre du thème 2. Il porte sur le développement de métamatériaux large bande et leurs applications dans la conception de lentilles à gradient d'indice (GRIN). Ces lentilles sont ensuite utilisées dans la réalisation d'antennes large bandes sectorielles. Nous présentons dans un premier temps un état de l'art sur les métamatériaux à gradient d'indice et les métasurfaces en configuration guidée. Ensuite, nous présenterons nos principales contributions sur cette thématique. Les travaux présentés dans ce chapitre se déclinent en deux parties. La première partie concerne la conception de résonateurs à métamatériaux large bande et des métasurfaces à gradient d'indice. Dans la deuxième partie, nous présenterons des antennes lentilles à base de ces métasurfaces fonctionnant en bande X.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux cités ci-dessous :

Thèse en cours	[T-2]
Masters	[MP-3]
Revue internationale	RI-3, RI-10, RI-14, RI-15
Revue nationale	RN-1
Communications internationales	CI-1, CI-2, CI-42, CI-45
Communications nationales	CN-1, CN-2, JS-1, JS-5
Collaborations	LEME, EADS

4.1.1 État de l'art et contexte

Dans les premiers travaux, les métamatériaux étaient élaborés à partir de cellules unitaires identiques répétées dans un réseau, tel que le milieu qui en résulte puisse être considéré comme homogène dans le sens où la réponse électromagnétique moyenne ne varie pas dans la structure. Toutefois, les métamatériaux dont les propriétés électromagnétiques moyennes varient en fonction de leur position dans la structure peuvent aussi être fabriqués. Ces matériaux sont intéressants ; par exemple, ils peuvent être utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les lentilles et les systèmes de filtrage. De plus, puisque les métamatériaux permettent une liberté sans précédent de contrôler les éléments des tenseurs constitutifs indépendamment, point par point dans toute une région de l'espace, ils ont été largement utilisés comme la technologie pour réaliser des structures conçues par la technique de la transformation optique (c.f. chapitre 3).

Dans le premier article qui a fait état de ce genre de métamatériaux à gradient, les auteurs avaient utilisé une structure à base de SRRs avec des dimensions non-uniformes et montré une déviation du faisceau pour valider le gradient d'indice (GRIN) [Smith 05]. Par exemple, une lentille GRIN a été utilisée pour dépointer le faisceau d'une antenne cornet dans [Ma 09a]. Par la suite, des lentilles GRIN ont été conçues en utilisant un matériau à indice de réfraction négatif [Gregor 05, Driscoll 06].

Pour éviter d'utiliser des métamatériaux volumiques encombrants, des structures GRIN ont été développées en mode guidé [Liu 09c]. En effet, le mode guidé a été possible en utilisant non pas des résonateurs « normaux » mais plutôt des résonateurs complémentaires, en l'occurrence ici par des SRRs complémentaires (CSRRs). Les résonateurs complémentaires ont été introduits dans [Falcone 04] pour la conception de métasurfaces homogénéisables planaires en appliquant le principe de Babinet aux résonateurs à métamatériaux classiques. Ce type de métasurfaces en configuration guidée a montré son utilité dans la démonstration d'un tunnel électromagnétique via une permittivité proche de zéro [Liu 08].

Les réalisations ci-dessus, bien que très intéressantes, étaient limitées par l'étroitesse de la bande de fréquences de fonctionnement, qui est due au caractère résonant des résonateurs utilisés. Les pertes peuvent aussi être très grandes lorsque nous travaillons proche de la résonance. Or, les applications pour les systèmes multi-bandes et large bande sont nombreuses. Les métamatériaux GRIN large bande basés sur des cellules non-résonantes

ont donc été développés [Liu 09a]. L'idée est d'utiliser des résonateurs qui fonctionnent à, par exemple, $\lambda/4$ voire $\lambda/2$. Ce qui est certain, c'est qu'à la résonance, la cellule ne sera pas homogène. Par contre, pour des fréquences très inférieures à celle de la résonance, la cellule unitaire se comporte comme un milieu effectif avec des paramètres électromagnétiques effectifs présentant de faibles pertes et une faible dispersion. Ces métamatériaux GRIN ont par la suite été utilisés dans plusieurs applications telles que :

- la cape tapis « ground-plane cloak » [Liu 09b]
- des lentilles 2D [Ma 09b, Cheng 09, Pfeiffer 10, Ma 10a, Kundtz 10, Ma 11] et 3D [Ma 10b]
- une antenne lentille [Chen 11].

4.1.2 Objectifs et contributions

Dans ce chapitre, je présente nos travaux dans le domaine des métasurfaces GRIN et leurs applications aux antennes. Ces travaux sont développés depuis deux ans dans le cadre de la thèse d'A. Dhouibi que j'encadre et qui sera soutenue en novembre 2013. C'est une thématique assez récente dans mes activités et les résultats obtenus sont encore parcellaires. Les objectifs de notre travail sont :

- développer des résonateurs à métamatériaux large bande
- concevoir des lentilles GRIN large bande et plates
- mettre l'accent sur la réalisation des lentilles et association avec une source primaire pour réaliser des antennes lentilles, contrairement à la majorité des études de la littérature qui ne traitent pas l'association avec une source primaire
- valider expérimentalement les performances des antennes lentilles

Dans ce chapitre, nous étudierons dans un premier temps numériquement des résonateurs à métamatériaux non-résonants fonctionnant sur toute la bande X. En effet, nous utilisons des résonateurs quart-d'ondes bien en-dessous de leur fréquence de résonance, là où les réponses en réflexion et transmission sont très stables en fréquences et là où nous pouvons appliquer la procédure d'homogénéisation car les dimensions géométriques sont faibles devant la longueur d'onde. Les paramètres effectifs extraits sont stables sur une large bande de fréquences. Les réponses en fréquences ainsi que les paramètres effectifs extraits seront présentés.

Ces résonateurs seront ensuite utilisés dans la conception de lentilles GRIN planaires basées sur le principe de Lüneburg. Associées à des sources excitatrices, les antennes lentilles seront caractérisées et validées par des simulations numériques et des caractérisations expérimentales.

4.2 Conception de métamatériaux non-résonants planaires

Dans cette section, nous présentons notre étude sur les éléments non-résonants qui sont utilisés en configuration transverse électrique-magnétique (TEM) pour un fonctionnement large-bande.

Comme présenté dans les sections 2.2 et 2.3, les métamatériaux classiques sont des

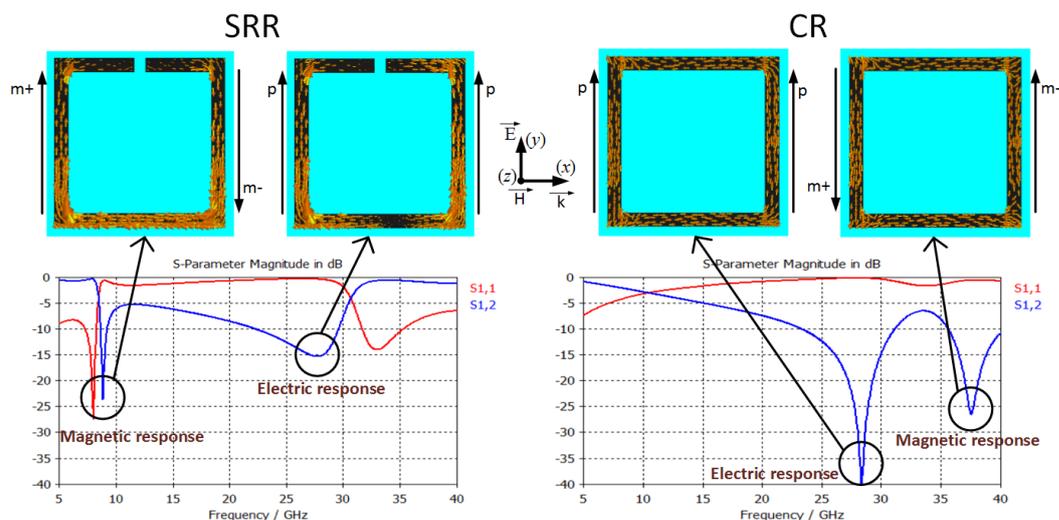


FIGURE 4.2.1: Topologie d'un SRR et d'un CR et leurs réponses pour une onde électromagnétique incidente.

éléments résonants LC, donc à fonctionnement bande étroite. Partant du principe où nous travaillons avec des systèmes à faible profil en configuration guidée TEM, c'est à dire deux plaques métalliques parallèles, nous avons donc opté pour une métasurface parallèle aux deux plaques et donc perpendiculaire au champ électrique. En ayant fixé la polarisation du champ incident sur les cellules constituant la métasurface, l'idée suivante était de concevoir le résonateur électrique adapté.

Le résonateur SRR de Pendry [Pendry 99], évoqué dans le chapitre 2, se comporte comme un dipôle magnétique à sa fréquence de résonance. Pour une onde électromagnétique incidente avec le champ magnétique orienté perpendiculairement au plan du résonateur, le flux magnétique induit un courant qui circule sur celui-ci (Fig. 4.2.1). Ce courant produit à son tour un flux magnétique opposé au champ magnétique incident. Un dipôle magnétique est alors créé et il correspond à une réponse magnétique pure pour la résonance fondamentale. Il existe aussi une deuxième résonance, qui est électrique où le courant circule dans le même sens sur les deux bras du SRR parallèles au champ électrique (création de deux moments dipolaires électriques) et vient s'annuler sur les bras perpendiculaires. Lorsque nous supprimons la coupure du SRR, nous obtenons un résonateur fermé « Closed Ring (CR) ». Comme le SRR, ce résonateur CR présente deux résonances, une électrique (la résonance fondamentale) et une magnétique. La résonance électrique du CR se produit autour de 28 GHz, à la même fréquence que la résonance électrique dans le SRR. Par contre, la résonance magnétique du CR est plus haute en fréquence. Il est important de noter que la résonance électrique dans le CR ici se produit à $\lambda_0/3$. Donc la cellule unitaire ne se comporte pas comme un milieu effectif à la résonance, par contre elle l'est pour des fréquences bien inférieures, par exemple dans la bande X [8,2 GHz - 12,4 GHz] où on est loin de la résonance et où les paramètres

constitutifs sont non dispersifs.

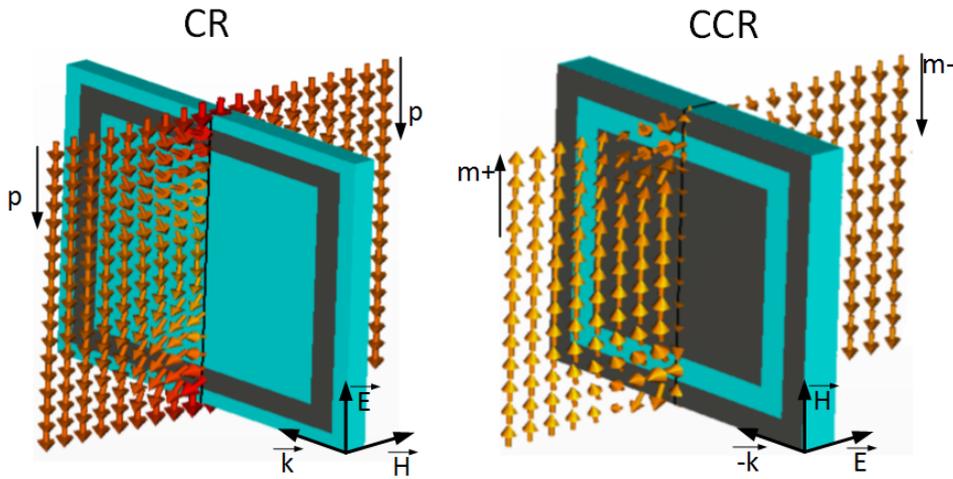


FIGURE 4.2.2: Application du principe de Babinet pour la conception du CCR.

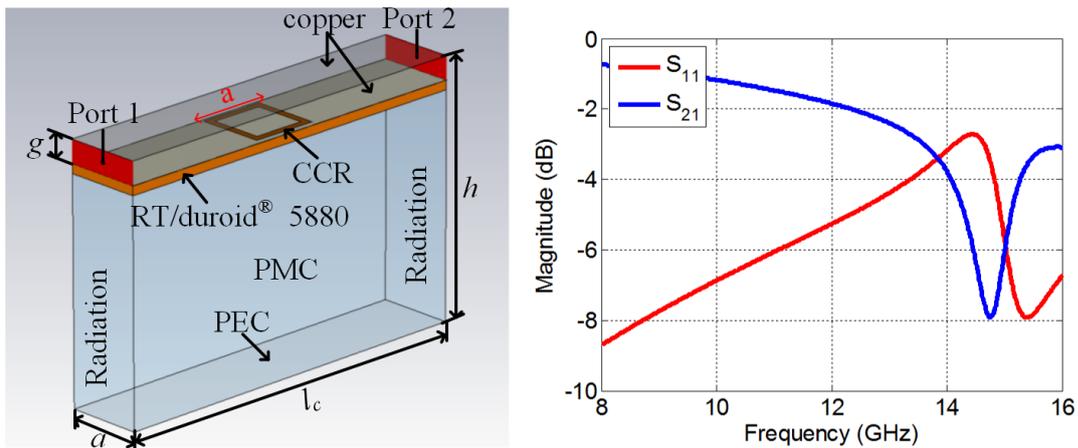


FIGURE 4.2.3: Configuration de simulation du CCR et les paramètres S associées.

En appliquant le principe de Babinet, on a créé un résonateur complémentaire au CR, que nous avons nommé CCR (Complementary Closed Ring). L'excitation du CCR se fait comme indiqué sur la Fig. 4.2.2. Le CCR, qui est en fait une fente en forme d'anneau faite dans un plan métallique présente une résonance fondamentale magnétique lorsque le champ électrique de l'onde incidente est perpendiculaire au plan de celui-ci. Le CCR sous cette incidence est donc adapté à notre système de configuration guidée.

La cellule unitaire du CCR en configuration de simulation est montrée sur la Fig. 4.2.3. Deux plaques parallèles forment le guide TEM et le CCR est gravé dans la plaque

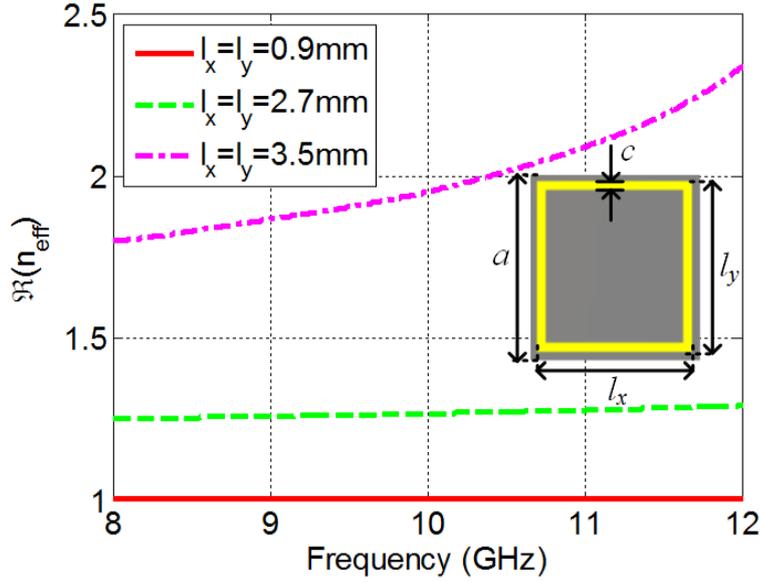


FIGURE 4.2.4: Exemples de valeurs d'indices pouvant être obtenues des CCRs.

inférieure.

La polarisation de l'onde incidente de TEM est limitée par l'utilisation de conditions de conducteurs magnétiques parfaits (PMC) sur les côtés du domaine de simulation dans le plan xz . L'espace g entre le motif en circuit imprimé et la plaque de cuivre supérieure de guide d'ondes est fixé à 1 mm. Les deux ports sont positionnés loin de la structure de résonateur afin d'éviter un couplage champ proche entre les ports et le CCR. Toutefois, les plans de référence de la phase pour la procédure d'extraction de paramètres constitutifs sont choisis de telle sorte que la période a du CCR unitaire est fixée à 3,6 mm. Les paramètres S montrent une résonance de type Lorentzienne.

La Fig. 4.2.4 montre la partie réelle de l'indice effectif n_{eff} pour trois tailles différentes de la cellule CCR. Ceux-ci sont utilisés dans leur régime de fréquence non-résonant tels qu'ils présentent des propriétés des matériaux large bande dans la bande de 8 GHz à 12 GHz. En effet, pour des fréquences bien en dessous de la résonance, la cellule se comporte comme un milieu effectif. Nous pouvons observer que l'indice présente une faible dispersion, sauf pour le cas $l_x = l_y = 3,5$ mm puisque nous nous rapprochons de la résonance qui est autour de 14 GHz pour $a = 3,6$ mm.

g est un paramètre très important ici car une légère variation entraîne un changement conséquent dans la valeur de l'indice comme illustré sur la Fig. 4.2.5. En effet, plus g est grand plus les caractéristiques constitutifs du métamatériau sont dilués dans de l'air et donc plus la valeur de n_{eff} va diminuer et tendre vers 1.

Ainsi, afin de créer un gradient d'indice sur une métasurface, nous appliquons une variation des dimensions géométriques des résonateurs.

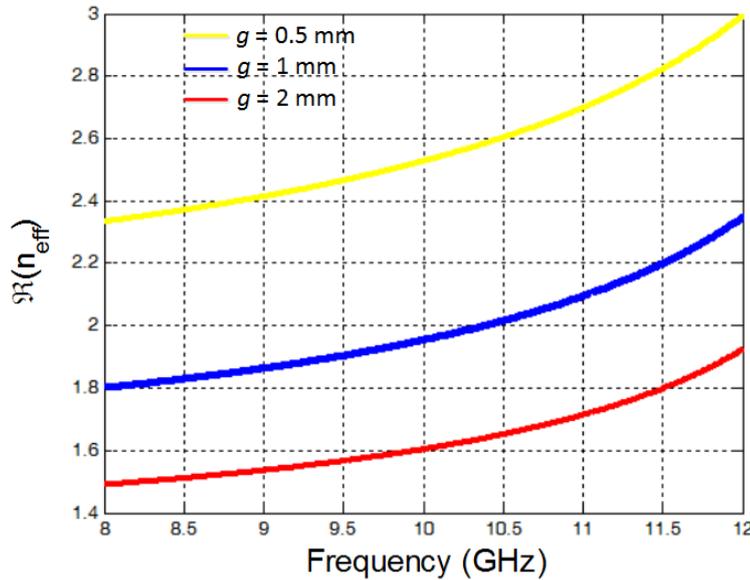


FIGURE 4.2.5: Influence du gap g sur n_{eff} pour le CCR avec $l_x = l_y = 3,5$ mm.

4.3 Conception d'antennes lentilles large bande à gradient d'indice

Le CCR présenté dans la section 4.2 est utilisé pour la conception d'antennes lentilles planaires large bande. Deux types de lentilles fonctionnant selon le principe de Lüneburg seront étudiés : la lentille de Lüneburg et la lentille HMFE « Half Maxwell Fish-Eye ». Dans cette section, nous montrons comment les métasurfaces peuvent être utilisées pour exploiter la souplesse des matériaux de gradient d'indice pour les applications antennaires.

Pendant des siècles, l'approche classique à la conception d'une lentille a été de meuler les surfaces d'un matériau uniforme de façon à sculpter les trajets que les rayons de lumière suivent quand ils transitent par les interfaces. Les lentilles réalisées par ce processus de conformer les surfaces peuvent être de très haute qualité, mais sont néanmoins limitées par les aberrations géométriques qui sont inhérentes à la façon dont la lumière est transmise à l'interface entre deux matériaux. De ce fait, une approche pratique plus naturelle, mais moins convenable à la conception de lentilles serait de varier l'indice de réfraction dans un volume entier. De cette manière, nous contrôlerions beaucoup plus les trajectoires des rayons.

Comme la trajectoire de la lumière n'est altérée qu'à l'entrée et aux surfaces de sortie d'une lentille classique et se propage en ligne droite dans le volume de la lentille, il est difficile de créer un dispositif optique idéal comme on le souhaite. Des aberrations monochromatiques sont généralement inévitables avec une optique réfractive et peuvent

être au mieux minimisées par l'utilisation de plusieurs lentilles. Les profils d'aberration des lentilles fixent une limite ultime pour certaines applications d'imagerie de haute performance.

Les lentilles GRIN représentent une autre approche pour la conception de lentilles. Au lieu de contrôler le trajet de l'onde à l'interface entre deux diélectriques différents, l'indice de réfraction est varié dans la lentille. Les rayons peuvent être guidés avec beaucoup plus de contrôle de l'entrée à la sortie de la lentille. Même si les lentilles GRIN offrent des avantages potentiels significatifs sur les lentilles conventionnelles, elles sont beaucoup moins fréquentes dans les applications pratiques. En effet, le procédé de réalisation des gradients de grand indice de façon contrôlée, constitue un défi difficile de fabrication. L'avènement des métamatériaux suggère que les structures GRIN peuvent être plus facilement réalisables en utilisant les milieux artificiellement structurés. De plus, comme les métamatériaux offrent un éventail beaucoup plus large de propriétés électromagnétiques, y compris les réponses électrique et magnétique et anisotropes, on s'attendrait à une gamme plus large de modèles de lentilles.

Pour illustrer l'utilisation des métamatériaux GRIN dans la conception de lentilles, nous commencerons par le principe de Luneburg. Nous savons depuis longtemps qu'il est possible de créer une lentille sphérique sans aucune aberration, dont le point focal réside sur une sphère [Luneburg 44]. Cette lentille est la lentille de Luneburg. L'exigence du gradient d'indice peut être traitée par l'utilisation de résonateurs à métamatériaux.

L'implémentation des lentilles de Luneburg se révèle très intéressante dans une variété d'applications antennaires [Rudduck 62, Rotman 63, Cooke 85, Smith 89, Xue 07, Hua 13]. Leur principal avantage réside en leur capacité à former une multitude de faisceaux qui peuvent pointer simultanément et/ou séparément dans des directions quelconques sur une large bande de fréquences. En effet, la plupart des systèmes de communications par satellite nécessitent des systèmes antennaires multifaisceaux qui opèrent aux fréquences millimétriques.

En 1854, James Clerk Maxwell a introduit la lentille Maxwell Fish-Eye « MFE » [Maxwell 54]. Son principe de fonctionnement est très simple : une onde sphérique à la surface de cette lentille est transformée en une onde localement plane en son centre et elle ressort ensuite comme une onde sphérique sur le côté opposé. Une équipe de recherche de l'IETR à Rennes a récemment montré que la lentille MFE peut être utilisée pour des applications d'antennes directives. En effet, les auteurs ont proposé d'utiliser que la moitié de la lentille afin d'avoir une onde plane en sortie [Fuchs 06b, Fuchs 06a]. Cette demie-lentille MFE a donc été appelée Half Maxwell Fish-Eye (HMFE).

En 1944, le principe de la focalisation de Luneburg a été proposé en se basant sur les travaux de Maxwell sur la lentille MFE [Luneburg 44]. En se référant aux principes de l'optique géométrique, une lentille présentant un gradient d'indice de réfraction qui varie selon la loi de Luneburg permet une focalisation des ondes planes incidentes en un point situé sur sa périphérie.

Nous présenterons donc dans les parties qui suivent, l'implémentation de la lentille de Luneburg et HMFE via l'utilisation de métamatériaux GRIN planaires et large bande. Ces lentilles seront associées à une source planaire afin de quantifier les performances

de ces dispositifs comme des antennes. Des mesures effectuées en champ proche et en champ lointain de deux prototypes d'antennes lentilles seront présentées.

4.3.1 Antenne lentille Lüneburg

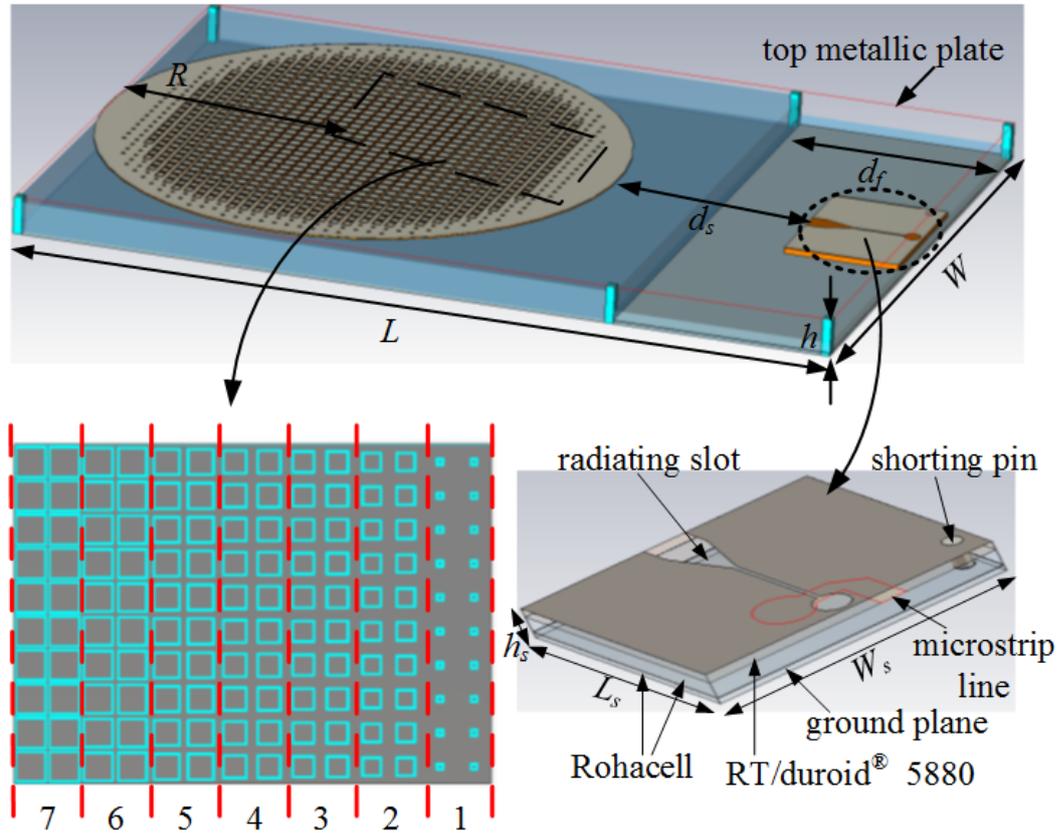


FIGURE 4.3.1: Configuration de l'antenne-lentille Lüneburg à métamatériaux.

La validation expérimentale de l'émission directive des antennes lentilles était dans la majorité des cas jusque-là basée sur l'utilisation d'antennes cornets ou de transitions coaxiale-guide d'ondes ou même des connecteurs coaxiaux comme des sources primaires [Cheng 09, Ma 10a, Dockrey 13]. Ici, nous abordons la complexité d'associer aux lentilles une source planaire adaptée en bande X. Notre choix de la technologie planaire intégrée pour la réalisation de la source, contrairement à ce qui se fait dans la littérature, nous permet de diminuer considérablement l'encombrement de l'antenne [Dhouibi 12].

La métasurface à gradient d'indice représentant la lentille de Lüneburg est insérée entre deux plaques métalliques parallèles constituant un guide d'ondes Quasi-TEM de dimensions $130 \times 190 \text{ mm}^2$ et espacées de $h = 11 \text{ mm}$ (Fig. 4.3.1). Le gap entre la plaque supérieure du guide Quasi-TEM et le plan de la métasurface est fixé à 1 mm confor-

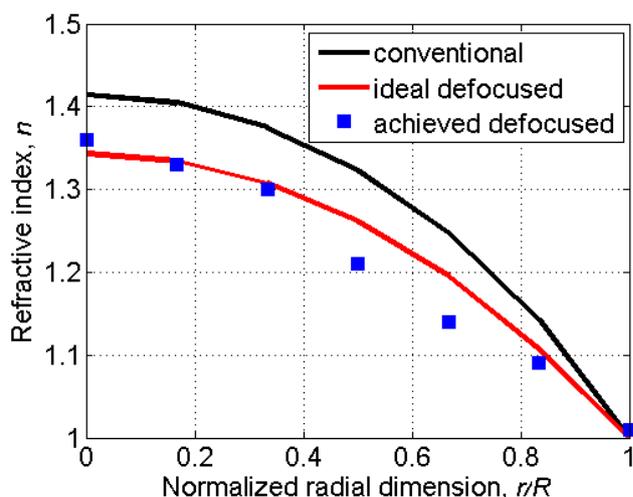


FIGURE 4.3.2: Gradient d'indice nécessaire pour une lentille de Luneburg.

mément au modèle de simulation présenté sur la Fig. 4.2.3. La lentille est discrétisée en sept zones différentes se rapprochant chacune d'une valeur de l'indice de réfraction bien définie. La lentille à métamatériaux est fixée sur un support en mousse de type Rohacell ayant une permittivité très proche de l'unité.

Pour générer un point source à la périphérie de la lentille, une antenne planaire de type Vivaldi est intégrée entre les deux plaques métalliques délimitant le guide d'ondes Quasi-TEM. Son diagramme de rayonnement est unidirectionnel dans le plan du substrat et présente un faible niveau de polarisation croisée. Cette source est conçue pour produire un champ électrique normal au plan des CCR. Elle est composée d'une fente rayonnante sur un substrat RT/Duroid[®] 5880 ($\epsilon_r = 2,2$ et $\tan\delta = 0,0009$) d'épaisseur 1,6 mm. La fente est excitée par une ligne micro-ruban et un stub radial sur la face inférieure du substrat. En alimentant l'antenne Vivaldi de la sorte, la ligne micro-ruban peut générer une onde sphérique parasite à proximité de la lentille qui risque d'introduire de la distorsion au niveau des diagrammes de rayonnement. Pour pallier à ce problème, l'antenne source est placée sur deux couches de mousse de type Rohacell séparées par un plan métallique, qui est relié au plan de l'antenne par un via métallique. Ce via permet entre autres de créer un filtre anti-TEM pour les ondes qui peuvent se propager en dessous de la source et concentrer ainsi l'énergie de l'antenne entre les plaques métalliques contenant la lentille. Des parties métalliques ont été ajoutées à la périphérie de la lentille de Luneburg discrétisée pour garder une forme circulaire de la structure. Le rayon de la lentille que nous avons réalisée est donc de 56 mm (environ 2λ à 12 GHz), même si le gradient est effectué sur 7 zones de 6,66 mm chacune.

L'association d'une source planaire à notre lentille implique une défocalisation. En effet, le centre de phase de la source qui excite la structure ne se situe pas exactement à la périphérie de la lentille. Nous avons donc conçu une lentille défocalisée [Cheng 60].

Le gradient d'indice idéal donné par la relation $n(r) = \sqrt{2 - (r/R)^2}$ a donc été modifié. La Fig. 4.3.2 montre le gradient nécessaire et le gradient réalisé par les cellules CCR.

La Fig. 4.3.3 présente l'adaptation simulée et mesurée du système antenne (antenne + lentille). L'insertion de la métasurface représentant la lentille n'a que très peu d'influence sur l'adaptation de la source Vivaldi seule dans le guide Quasi-TEM. Une bonne adaptation ($S_{11} < -10$ dB) est observée sur une large bande de fréquences allant de 8 à 12 GHz.

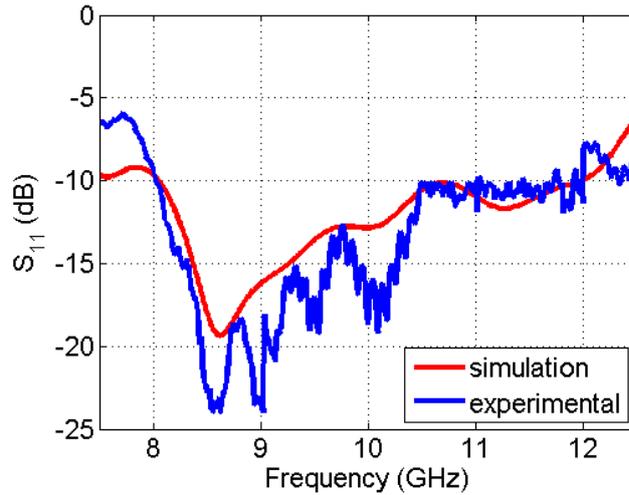


FIGURE 4.3.3: Adaptation de l'antenne lentille Lüneburg.

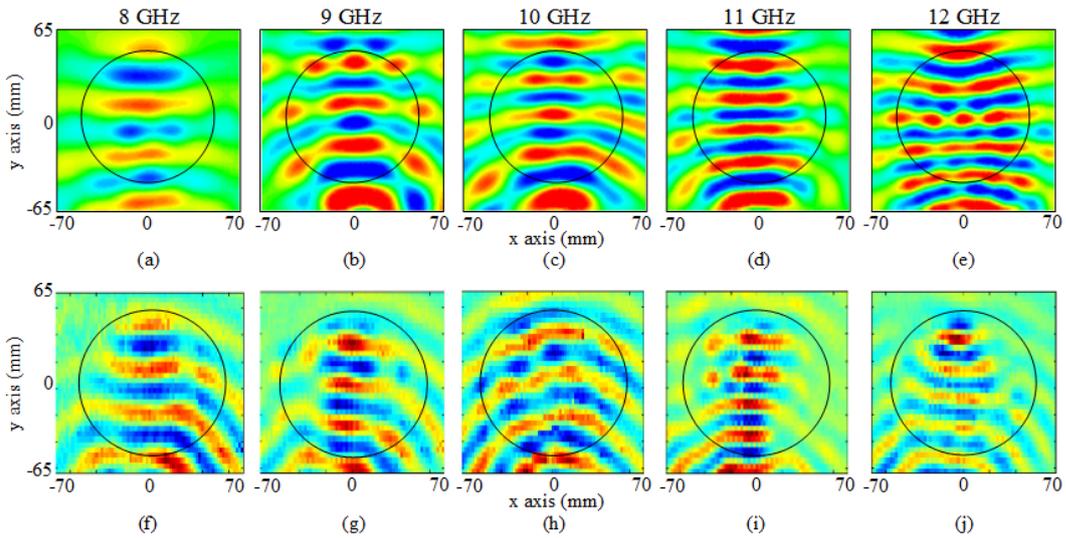


FIGURE 4.3.4: Cartographie du champ électrique de la lentille Lüneburg.

La cartographie du champ électrique à la surface de la lentille est présentée sur la Fig. 4.3.4. Les simulations ont été réalisées avec CST Microwave Studio en modélisant les métamatériaux par des zones de diélectriques à permittivités différentes. Les fronts d'ondes incidents émis par la source Vivaldi traversent la lentille avec très peu de réflexions et se transforment en ondes quasi-planes sur le côté opposé de la lentille.

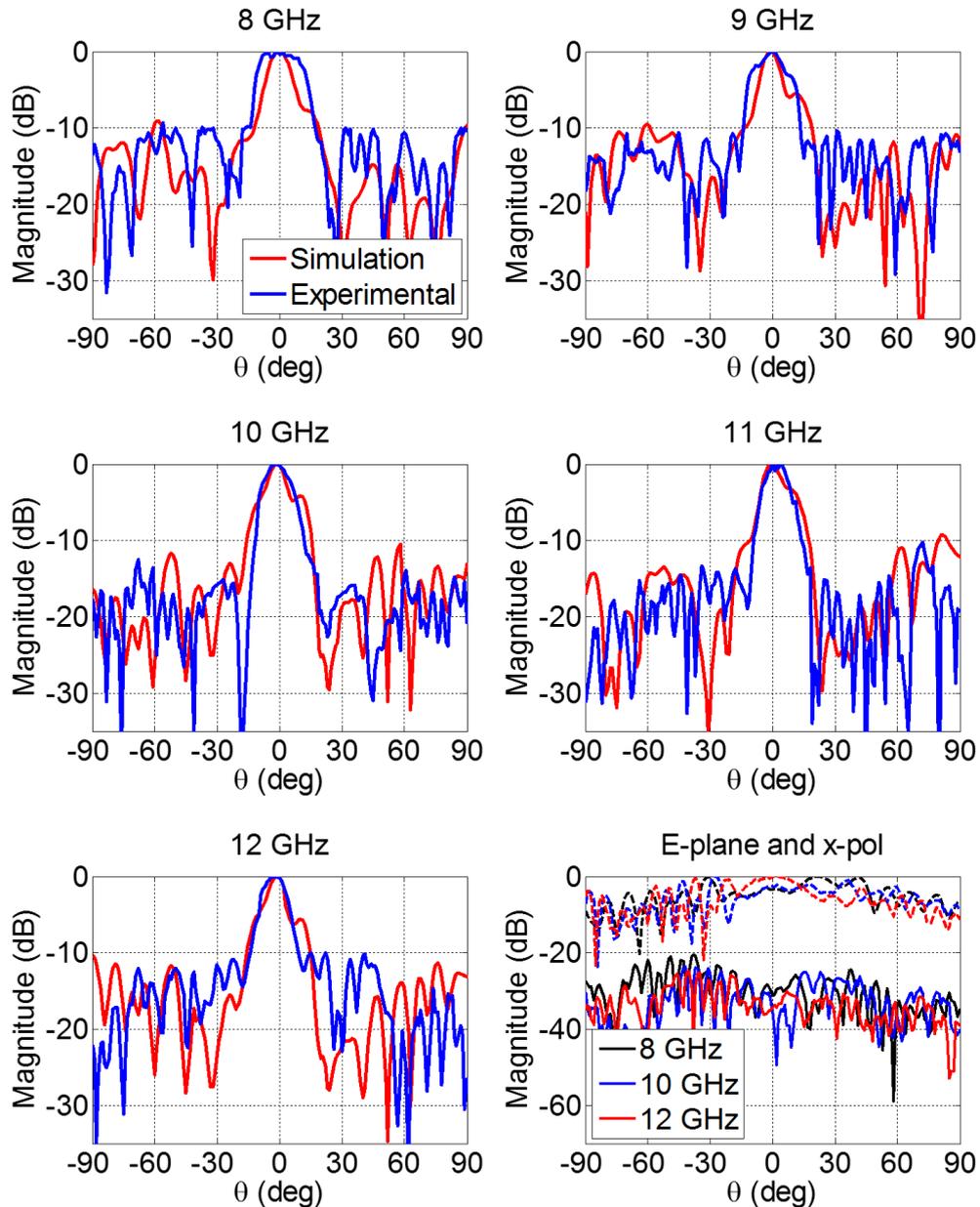


FIGURE 4.3.5: Diagrammes de rayonnement de l'antenne lentille Luneburg.

Des mesures de diagrammes de rayonnement faites en chambre anéchoïque sur l'antenne lentille montrent des diagrammes très directifs dans le plan H sur toute la bande de fréquences de 8 GHz à 12 GHz (Fig. 4.3.5). Le niveau des lobes secondaires reste inférieur à -10 dB. Par contre, une légère asymétrie apparaît au niveau des lobes secondaires, qui est due à la ligne d'excitation décentrée. Les diagrammes dans le plan E montrent des faisceaux larges puisque la lentille n'agit pas dans ce plan. Le niveau des polarisations croisées reste assez faible (< -20 dB).

Les résultats expérimentaux, même s'ils ne sont pas parfaits, montrent clairement la possibilité d'utiliser une métasurface à gradient d'indice comme une lentille. Nous avons choisi les paramètres du milieu, telle qu'un gradient relativement constant dans l'indice se produit le long de la métasurface. Le gradient est confirmé par des expériences de focalisation du faisceau.

4.3.2 Antenne lentille « Half Maxwell Fish-Eye »

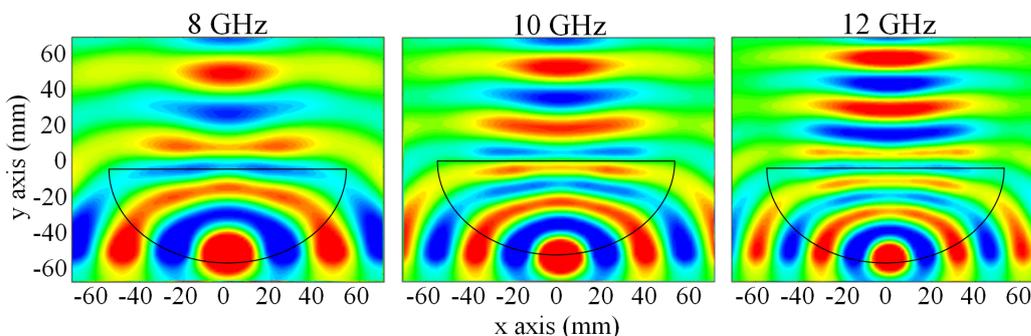


FIGURE 4.3.6: Cartographie du champ électrique de la lentille HMFE.

Le deuxième exemple de lentille que nous avons conçue est la HMFE. Le gradient d'indice varie de 1 à 2 dans une géométrie semi-circulaire et est donné par la relation $n(r) = \frac{n_0}{1+(r/R)^2}$, où n_0 est l'indice au centre de la lentille, R et r sont respectivement le rayon et la distance du centre de la lentille. La configuration de l'antenne lentille HMFE est la même que celle utilisée sur la Fig. 4.3.1 pour la Luneburg. Vu que nous avons utilisé la même source Vivaldi pour exciter la lentille, qui n'a que très peu d'influence sur l'adaptation de la source seule dans le guide Quasi-TEM, l'adaptation de l'antenne lentille HMFE est similaire à la précédente [Dhouibi 13a, Dhouibi 13b].

La distribution de champ observée en simulation est présentée sur la Fig. 4.3.6. Comme dans le cas de l'antenne lentille Luneburg, les fronts d'onde circulaires sont aplatis et les ondes cylindriques sont transformées en quasi-planes. Les diagrammes de rayonnement mesurés montrent le comportement directif dans le plan H (Fig. 4.3.7). Les lobes secondaires restent correctes (< -10 dB). En ce qui concerne la polarisation croisée, le niveau est inférieur à -19 dB dans toute la bande de fréquences ciblée.

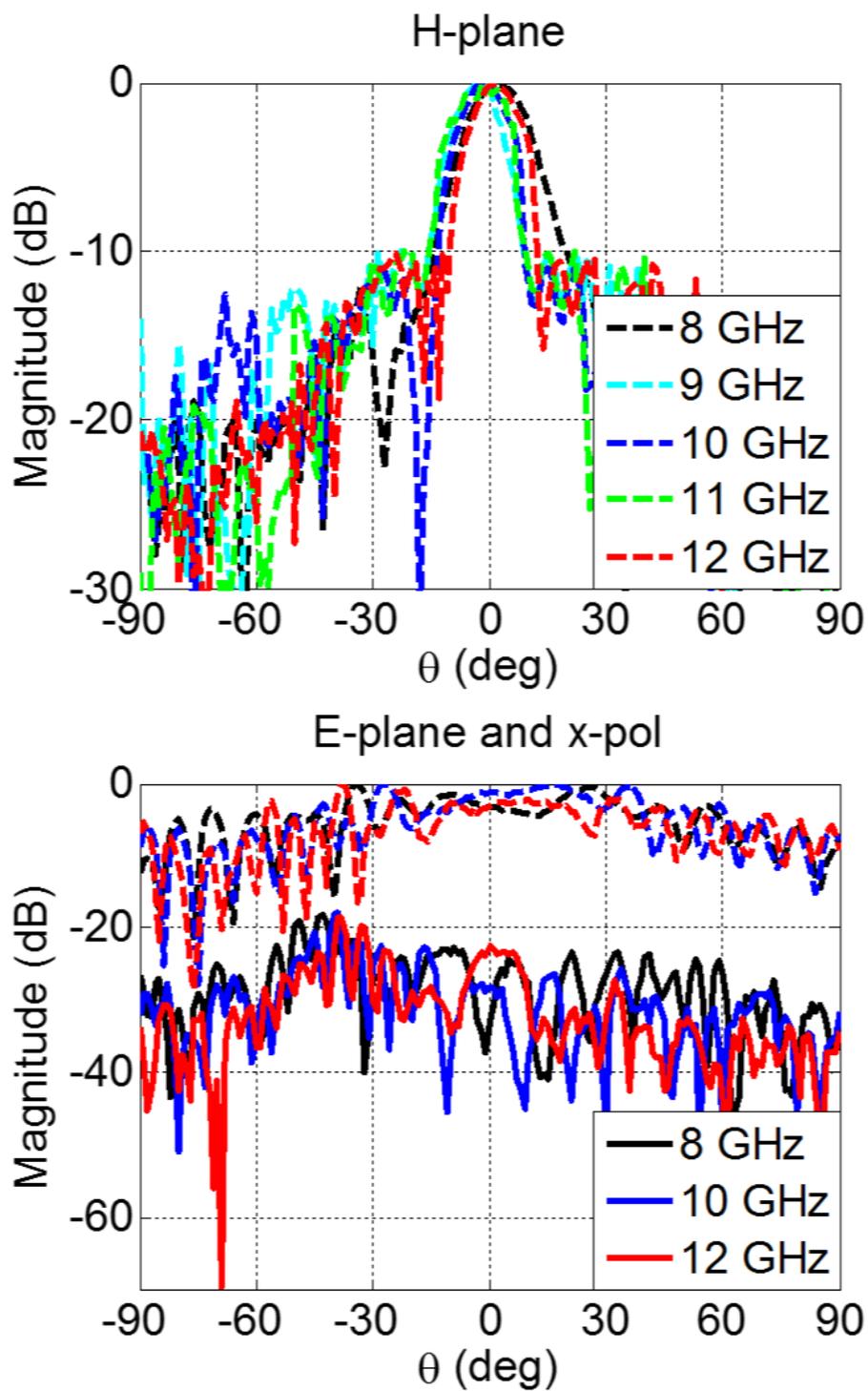


FIGURE 4.3.7: Diagrammes de rayonnement de l'antenne lentille HMFE.

4.4 Conclusion et perspectives

Les travaux rapportés dans ce chapitre concernent le développement de structures à métamatériaux planaires fonctionnant sur une large bande de fréquences et leurs applications à la conception de lentilles à gradient d'indice pour la réalisation d'antennes directives. En effet, dans ce chapitre, nous avons présenté non pas des méta-atomes qui résonnent à $\lambda_0/10$ voire moins, mais plutôt supérieur à $\lambda_0/4$. Et donc, ces résonateurs ne peuvent pas être considérés comme des milieux effectifs à la résonance. Par contre, ils peuvent l'être pour des fréquences nettement inférieures à la résonance. Et de plus, comme nous sommes loin de la résonance, les paramètres constitutifs extraits présentent des caractéristiques large bande.

Ces travaux dans le domaine des antennes lentilles ont été conduits dans le cadre de la thèse d'A. Dhoubi financé par le projet METAQOPT de la Fondation EADS. Le but du projet est d'exploiter les propriétés de métamatériaux large bande pour des applications antennaires.

J'ai donc commencé ce chapitre par une présentation des structures à gradient d'indice à base de métamatériaux pour terminer par des résonateurs planaires en configuration guidée fonctionnant sur une large bande de fréquences. Ensuite, j'ai présenté la mise en œuvre de métasurfaces à gradient d'indice pour la conception de deux lentilles qui obéissent à la loi de Lüneburg : la Lüneburg et la HMF. De telles lentilles plates peuvent présenter de faibles pertes car nous travaillons en dehors de la résonance et donc, peuvent aussi potentiellement produire une focalisation plus nette et améliorer les caractéristiques d'imagerie. En outre, puisque la permittivité et la perméabilité peuvent être contrôlées séparément dans les métamatériaux, l'indice peut être varié tout en conservant une impédance quasi-constante, permettant de grands gradients tout en maintenant une bonne adaptation sur la lentille. Ces deux lentilles insérées dans un guide d'ondes Quasi-TEM et excitées par une source intégrée ont été validées expérimentalement comme des systèmes antennaires à profil plat.

Les résultats présentés dans ce chapitre, sont issus des travaux issus de la thèse d'A. Dhoubi que j'ai encadré. Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications dans des revues et des conférences. Par conséquent, je remercie très sincèrement A. Dhoubi pour les travaux effectués et aussi la Fondation EADS pour leur support financier.

La suite de ces travaux consiste à réaliser des antennes lentilles à métamatériaux où nous pourrions dépointer le faisceau. Des travaux ont déjà débutés dans ce sens et d'autres travaux portant sur la lentille Miñano, qui est une variante de la lentille Maxwell Fish-Eye est aussi en cours dans le cadre d'un stage de Master2.

Bibliographie

- [Chen 11] X. Chen, H.F. Ma, X.Y. Zou, W.X. Jiang & T.J. Cui. *Three-dimensional broadband and high-directivity lens antenna made of metamaterials*. Journal of Applied Physics, vol. 110, no. 4, page 044904, 2011.
- [Cheng 60] D. Cheng. *Modified luneberg lens for defocused source*. Antennas and Propagation, IRE Transactions on, vol. 8, no. 1, pages 110–111, 1960.
- [Cheng 09] Q. Cheng, H.F. Ma & T.J. Cui. *Broadband planar Luneburg lens based on complementary metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 95, no. 18, page 181901, 2009.
- [Cooke 85] W. Cooke, D. Blount & J. Coon. *Airborne electronically-switched Luneburg lens antenna system*. In Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, volume 23, pages 595–598, 1985.
- [Dhouibi 12] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Compact metamaterial-based substrate-integrated Luneburg lens antenna*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 11, pages 1504–1507, 2012.
- [Dhouibi 13a] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Low-profile substrate-integrated lens antenna using metamaterials*. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, vol. 12, pages 43–46, 2013.
- [Dhouibi 13b] A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. de Lustrac & A. Priou. *Metamaterial-based half Maxwell fish-eye lens for broadband directive emissions*. Applied Physics Letters, vol. 102, no. 2, page 024102, 2013.
- [Dockrey 13] J.A. Dockrey, M.J. Lockyear, S.J. Berry, S.A.R. Horsley, J.R. Sambles & A.P. Hibbins. *Thin metamaterial Luneburg lens for surface waves*. Physical Review B, vol. 87, page 125137, 2013.
- [Driscoll 06] T. Driscoll, D.N. Basov, A.F. Starr, P.M. Rye, S. Nemat-Nasser, D. Schurig & D.R. Smith. *Free-space microwave focusing by a negative-index gradient lens*. Applied Physics Letters, vol. 88, no. 8, page 081101, 2006.
- [Falcone 04] F. Falcone, T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J.D. Baena, J. Bonache, M. Beruete, R. Marqués, F. Martín & M. Sorolla. *Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials*. Physical Review Letters, vol. 93, page 197401, 2004.
- [Fuchs 06a] B. Fuchs, O. Lafond, S. Rondineau & M. Himdi. *Design and characterization of half Maxwell fish-eye lens antennas in millimeter waves*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 54, no. 6, pages 2292–2300, 2006.

- [Fuchs 06b] B. Fuchs, O. Lafond, S. Rondineau, M. Himdi & L. Le Coq. *Design and characterisation of half-Maxwell fish-eye lens antenna in 76-81 GHz band*. Electronics Letters, vol. 42, no. 5, pages 261–263, 2006.
- [Greigor 05] R.B. Greigor, C.G. Parazzoli, J.A. Nielsen, M.A. Thompson, M.H. Tanielian & D.R. Smith. *Simulation and testing of a graded negative index of refraction lens*. Applied Physics Letters, vol. 87, no. 9, page 091114, 2005.
- [Hua 13] C. Hua, X. Wu, N. Yang & W. Wu. *Air-filled parallel-plate cylindrical modified Luneberg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 1, pages 436–443, 2013.
- [Kundtz 10] N. Kundtz & D.R. Smith. *Extreme-angle broadband metamaterial lens*. Nature Materials, vol. 9, no. 2, pages 129–132, 2010.
- [Liu 08] R. Liu, Q. Cheng, T. Hand, J.J. Mock, T.J. Cui, S.A. Cummer & D.R. Smith. *Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies*. Physical Review Letters, vol. 100, page 023903, 2008.
- [Liu 09a] R. Liu, Q. Cheng, J.Y. Chin, J.J. Mock, T.J. Cui & D.R. Smith. *Broadband gradient index microwave quasi-optical elements based on non-resonant metamaterials*. Optics Express, vol. 17, no. 23, pages 21030–21041, 2009.
- [Liu 09b] R. Liu, C. Ji, J.J. Mock, J.Y. Chin, T.J. Cui & D.R. Smith. *Broadband ground-plane cloak*. Science, vol. 323, no. 5912, pages 366–369, 2009.
- [Liu 09c] R. Liu, X.M. Yang, J.G. Gollub, J.J. Mock, T.J. Cui & D.R. Smith. *Gradient index circuit by waveguided metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 94, no. 7, page 073506, 2009.
- [Luneburg 44] R.K. Luneburg. *Mathematical theory of optics*. Providence, Rhode Island : Brown University Press, 1944.
- [Ma 09a] H.F. Ma, X. Chen, H.S. Xu, X.M. Yang, W.X. Jiang & T.J. Cui. *Experiments on high-performance beam-scanning antennas made of gradient-index metamaterials*. Applied Physics Letters, vol. 95, no. 9, page 094107, 2009.
- [Ma 09b] Y.G. Ma, C.K. Ong, T. Tyc & U. Leonhardt. *An omnidirectional retro-reflector based on the transmutation of dielectric singularities*. Nature Materials, vol. 8, no. 8, pages 639–642, 2009.

- [Ma 10a] H.F. Ma, X. Chen, X.M. Yang, H.S. Xu, Q. Cheng & T.J. Cui. *A broadband metamaterial cylindrical lens antenna*. Chinese Science Bulletin, vol. 55, no. 19, pages 2066–2070, 2010.
- [Ma 10b] H.F. Ma & T.J. Cui. *Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens*. Nature Communications, vol. 1, page 124, 2010.
- [Ma 11] Y.G. Ma, S. Sahebdivan, C.K. Ong, T. Tyc & U. Leonhardt. *Evidence for subwavelength imaging with positive refraction*. New Journal of Physics, vol. 13, no. 3, page 033016, 2011.
- [Maxwell 54] J.C. Maxwell. *Solutions of problems, Problem No. 2*. Cambridge and Dublin Mathematical Journal, vol. 8, pages 188–195, 1854.
- [Pendry 99] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins & W.J. Stewart. *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 11, pages 2075–2084, 1999.
- [Pfeiffer 10] C. Pfeiffer & A. Grbic. *A printed, broadband Luneburg lens antenna*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 9, pages 3055–3059, 2010.
- [Rotman 63] W. Rotman & R. Turner. *Wide-angle microwave lens for line source applications*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 6, pages 623–632, 1963.
- [Rudduck 62] R.C. Rudduck & C.H. Walter. *Luneberg lenses for space communications*. Space Electronics and Telemetry, IRE Transactions on, vol. SET-8, no. 1, pages 31–38, 1962.
- [Smith 89] A.C. Smith, S.E.J. Aglionby & D.A. Smith. *An innovative mobile satcom antenna*. In Mechanical Aspects of Antenna Design, IEE Colloquium on, pages 9/1–9/7, 1989.
- [Smith 05] D.R. Smith, J.J. Mock, A.F. Starr & D. Schurig. *Gradient index metamaterials*. Physical Review E, vol. 71, page 036609, 2005.
- [Xue 07] L. Xue & V.F. Fusco. *24 GHz automotive radar planar Luneburg lens*. Microwaves, Antennas Propagation, IET, vol. 1, no. 3, pages 624–628, 2007.

Conclusions générales

Bilan des travaux effectués	153
Perspectives	154

Bilan des travaux effectués

Les travaux que j'ai présentés dans les différents chapitres ont mis en lumière mes activités de recherche, qui se déclinent selon deux thèmes majeurs :

- **Métasurfaces et antennes** qui portent sur :
 - développement de métasurfaces avec une structuration uniforme et non-uniforme
 - antennes imprimées de type cavité Fabry-Perot reconfigurables en fréquence et en dépointage angulaire
 - écrans électromagnétiques reconfigurables pour le conception de radômes
- **Structures à gradient, antennes et dispositifs microondes** qui portent sur :
 - développement de cellules à métamatériaux, de structures à gradient (permittivité, perméabilité et indice)
 - conception d'antennes et dispositifs via la technique de la transformation optique
 - conception d'antennes-lentilles plates

Dans chaque chapitre, nous avons dans un premier temps dressé un état de l'art relativement complet avant de présenter nos principales contributions. Ces travaux sont les fruits de thèses et de stages de Master auxquels j'ai participé à l'encadrement et ont été menés dans différents cadre :

- Projets ANR
- Projets contractuels
- Projet international
- Études amonts en interne

Perspectives

Dans la continuité de mes activités de recherche, je me consacre actuellement à la valorisation industrielle des antennes que nous avons développées. Cette tâche est très intéressante car elle demande à respecter des cahiers de charge où les performances requises sont très élevées. Les différents projets de valorisation sont :

1. Antenne pour station de base 4G pour la téléphonie mobile

Ce projet est mené en collaboration avec la société KYEMO, qui est une PME spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation d'antennes utilisées comme station de base pour les télécommunications mobiles. Il s'agit ici de concevoir une antenne fonctionnant dans les bandes de fréquences de la 4^{ème} génération (4G). Cette antenne sera basée sur l'utilisation d'une métasurface comme réflecteur dans une cavité Fabry-Perot. Une des contraintes de cette antenne est le fonctionnement bi-bande à 800 MHz et 2600 MHz, voire tri-bande ou quadri-bande, sans l'apport de composants actifs. Cette antenne devra aussi présenter un gain élevé tout en gardant un encombrement réduit et un coût de fabrication faible. Un projet de type FUI impliquant KYEMO et FREE mobile sera déposé à la fin 2013.

2. Antenne plane et conformée pour ASTRIUM

Ce projet commencera en septembre 2013 et sera mené en collaboration avec ASTRIUM filiale à 100% EADS, qui est le leader européen de l'industrie spatiale. Dans un premier temps, il concerne l'étude théorique de définition d'une antenne plane, directive, à dépointage contrôlable dans l'espace, et se basant sur l'utilisation de réflecteur à métamatériaux de type « Surface Partiellement Réfléchissante ». Un prototype sera fabriqué dans le but de valider le concept. Ensuite, dans un deuxième temps, le but est d'adapter cette antenne plane à une structure conformée représentative d'un lanceur de fusée. L'antenne devra fonctionner autour de 2245 MHz et devra montrer un dépointage dans un seul plan allant de 0° à 60° par pas de 20°.

3. Antenne pour les communications satellites (SATCOM)

L'objectif de ce projet est de concevoir un système antenne capable d'établir une communication vers un satellite en bande Ku (13,75 - 14,5 GHz). Le choix de cette bande de fréquences est lié au besoin de pouvoir établir une communication entre un satellite et une plateforme aérienne. Le but est de transmettre des informations relatives à une mission d'observation (drone male ou hale), mais aussi pour des applications civiles liées à la sécurité, ou internet et divertissement à bord des avions de lignes et d'affaires ou même à la maintenance préventive). La bande Ku est aussi choisie car elle permettra de mieux gérer la conception du démonstrateur avec les technologies classiques de circuits imprimés et des reports de composants localisés commercialisés grand public. Ce projet sera mené avec EADS IW.

A notre connaissance, il n'existe pas en France d'antennes avec de telles performances, surtout en ce qui concerne le dépointage, utilisant les technologies à base de métamatériaux. L'apport de métamatériaux doit permettre de réduire la taille des antennes, les

coûts de fabrication, et aussi d'installation et de maintenance. L'objectif est donc de réduire la taille des systèmes, et principalement leurs épaisseurs, d'offrir de nouvelles perspectives pour le bilan aérodynamique, de réduire les nuisances qu'apportent les systèmes classiques et de permettre l'utilisation d'une charge utile plus importante dans certaines configurations.

En ce qui concerne mes activités de recherche sur les lentilles à gradient d'indice pour les antennes plates, l'étape suivante est de travailler sur d'autres performances très recherchées. Deux idées claires peuvent être établies :

1. Agilité en fréquence

Il s'agit ici de mettre à profit l'intégration de composants actifs, tels que des diodes varicaps polarisées en tension, dans la lentille faite de cellules à métamatériaux. En changeant la tension de polarisation des cellules, nous nous attendons à ce que la lentille montre les mêmes caractéristiques en terme de paramètres électromagnétiques à une fréquence différente. Et en associant une source primaire adaptée à la lentille agile, nous serons en mesure de réaliser des antennes-lentilles agiles en fréquence.

2. Reconfigurabilité angulaire

De plus en plus d'applications demandent un suivi de cible, tel qu'un satellite, ce qui bien évidemment exige la reconfigurabilité angulaire du faisceau. Dans le cas des antennes-lentilles, le dépointage angulaire peut se faire en associant plusieurs sources espacées d'un angle spécifique à la périphérie de la lentille. La difficulté réside dans le couplage entre les sources primaires. Pour cela, nous pourrions aussi utiliser des cellules à métamatériaux pour leurs propriétés de bande interdite de transmission afin de découpler les sources. Un commutateur devra aussi être utilisé, afin de commuter entre une source et une autre, pour pouvoir par la suite changer d'angle de dépointage par rapport à la normale.

Nous pourrions par la suite combiner ces deux performances sur une seule antenne.

En ce qui concerne nos travaux dans le domaine des lentilles à gradient d'indice, je suis actuellement en train de monter une collaboration avec le Professeur C.-W. Qiu à la National University of Singapore (NUS). Dans le cadre de cette collaboration, nous prévoyons à court terme de travailler sur des lentilles à polarisation multiples, sachant que nous venons juste de proposer une publication sur une lentille à polarisation circulaire.

Dans le domaine de la transformation optique et dans le cadre de la thèse de J. Yi débutée en novembre 2012, nous travaillerons sur la conception de nouveaux dispositifs tels que des antennes dont les diagrammes de rayonnement peuvent être modélisés (« beam shaping »). Nous pouvons aussi penser à des dispositifs qui pourront être utilisés pour leurrer les radars. Des antennes miniatures ainsi que des adaptateurs d'impédance, que ce soit en technologie guide d'ondes ou ligne microruban seront aussi étudiés.

Tous les travaux cités ci-dessus étant basés sur l'utilisation de structures à métamatériaux, je continuerai à développer ce genre de structures pour mettre en évidence d'autres propriétés intéressantes qui pourront par la suite être exploitées dans diverses applications. Par exemple, sur les méta-atomes Z, nous travaillons actuellement avec des

super-cellules, c'est à dire des cellules comportant plusieurs éléments, afin de produire des résonances de modes sombres soit plus haut ou plus bas que la résonance fondamentale dans le spectre de fréquences. Exciter un mode sombre à une fréquence en dessous de la résonance fondamentale est très intéressante pour le domaine des microondes car on travaillerait alors avec un milieu où le rapport de milieu effectif serait plus grande. Alors qu'en optique, nous avons plutôt intérêt à exciter un mode sombre au-dessus de la résonance fondamentale, car cela nous permettrait de travailler avec dimensions géométriques plus grandes et donc plus facilement réalisable. Donc, les super-cellules nous apporteront un degré de liberté de plus dans l'excitation de modes piégés pour conduire à des résonances analogue soit à la transparence électromagnétiquement induite (EIT), soit à la réflexion électromagnétiquement induite (EIR). Dans la continuité de nos travaux sur les structures en « Z », une conception aux longueurs d'ondes optiques à 1,55 μm est envisagée en perspective d'applications dans les capteurs. L'avantage de ce métatome dans le domaine de l'optique repose sur le fait que l'excitation du mode sombre dans ce cas est déterminée que par sa géométrie et son asymétrie, et non d'un couplage entre deux résonateurs présentant des résonances très proches.

Je viens juste de lancer une nouvelle thématique dans le cadre de la thèse d'A. Niang, débutée en novembre 2013, qui porte sur l'utilisation des éléments non-Foster pour la conception d'antennes électriquement petites avec un fonctionnement large-bande. Ces éléments seront utilisés dans des convertisseurs d'impédance négative qui ont pour but de neutraliser les pertes résistives dans les circuits. Leurs associations à des antennes permettraient, dans le cas idéal, d'annuler la réactance équivalente des antennes dans une bande de fréquences infinie. Dans la perspective de concevoir des antennes à cavité Fabry-Perot large bande, nous étudierons aussi l'utilisation des éléments non-Foster dans des métasurfaces. Nous chercherons à mettre en œuvre des métasurfaces présentant une pente positive de la phase, afin de les utiliser comme réflecteurs dans les cavités. La variation atypique de la phase permettrait ainsi d'avoir un fonctionnement large bande avec les antennes à cavité.

Pour terminer, j'ai récemment commencé à travailler avec F. Monsef du Laboratoire des Signaux et Systèmes (LSS) sur les métasurfaces à phase reconfigurable pour des applications aux chambres réverbérantes. L'insertion de métamatériaux permettrait de modifier les conditions limites de telle sorte à émuler à une fréquence donnée un matériau magnétique parfait. L'effet principal est de modifier la phase du coefficient de réflexion par rapport au cas d'un conducteur métallique parfait. Cette modification de la phase dans le plan considéré aurait été obtenue dans le cas d'une paroi métallique parfaite déplacée. Il s'ensuit une modification « virtuelle » des dimensions de la chambre réverbérante au regard des ondes électromagnétiques et donc une modification de la densité modale qui est fonction du volume de la cavité.